

ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ И ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСКИЙ ИНСТИТУТ
ИНФОРМАТИЗАЦИИ, АВТОМАТИЗАЦИИ И СВЯЗИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ»
(ОАО «НИИАС»)

ТРУДЫ

ТРЕТЬЕЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ.
КОМПЬЮТЕРНОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ.
ИСУЖТ-2014**

18 ноября 2014 года
МОСКВА

«Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование» (ИСУЖТ-2014): Третья научно-техническая конференция с международным участием (18 ноября 2014 г., Москва, Россия) Открытое акционерное общество «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте». Дочернее общество ОАО «РЖД» (ОАО «НИИАС»), 2014 г.

Конференция проводилась при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований.

Утверждено к печати Программным комитетом конференции:

Сопредседатель

Гуляев Ю.В.,
академик РАН (ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, Москва)

Сопредседатель

Матюхин В.Г.,
д.т. н. (ОАО «НИИАС», Москва)

Сопредседатель

Кузнецов Н. А.,
академик РАН (ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, Москва)

Заместитель председателя

Доенин В. В.,
д.т.н., профессор (МГУПС, Москва)

Члены программного комитета:

Бородин А.Ф.,
д.т.н., профессор
(ОАО «НИИАС», Москва)

Гуда А. Н.,
д.т.н., профессор
(РГУПС, Ростов)

Кульба В. В.,
д.т.н., профессор
(ИПУ им. В. А. Трапезникова РАН, Москва)

Лай Мань Зунг,
к.т.н., доцент (Ханойский политехнический университет, Ханой, Вьетнам)

Нгуен Куэн Кань,
к.т.н., доцент (Вьетнамский национальный университет, Хошимин, Вьетнам)

Ржевский Г.А.,
профессор
(Открытый университет, Лондон, Великобритания)

Рудаков К. В.,
член-корреспондент РАН
(ВЦ им. А. А. Дородницына, Москва)

Скобелев П.О.,
д.т.н., проф.
(НПК «Разумные решения», Самара)

Шаров В. А.,
д.т.н., профессор (Центр технологической координации ОАО «РЖД», Москва)

В сборнике представлены материалы конференции по следующим направлениям:

- Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте
- Компьютерное и математическое моделирование транспортных процессов и систем
- Интеллектуальные технологии в сложных системах
- Мультиагентные технологии в управлении
- Управление движением на железнодорожном транспорте
- Моделирование перевозочного процесса и транспортной логистики
- Управление железнодорожной инфраструктурой и энергоэффективностью
- Спутниковые и геоинформационные технологии в управлении
- Измерения, контроль и диагностика в задачах управления
- Прогнозирование и моделирование процессов управления безопасностью на железнодорожном транспорте

Общая редакция сборника трудов конференции — д.т.н. Матюхин В.Г., д.т.н. Строгонов В.И.



Приветствие от Российского фонда фундаментальных исследований

Уважаемые участники и гости научно-технической конференции ИСУЖТ-2014!

Российский фонд фундаментальных исследований приветствует участников и организаторов третьей научно-технической конференции с международным участием «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование» и искренне желает вам успешной работы.

Хочется отметить несомненную важность и междисциплинарную направленность данной конференции. Ее темы затрагивают чрезвычайно широкий спектр вопросов по развитию железнодорожного транспорта.

Области исследования, являющиеся предметом обсуждения вашей конференции – передний край современной науки.

Фонд в своей деятельности поддерживает эти исследования, учитывая важность, значимость и актуальность важнейших задач обеспечения безопасной эксплуатации сложных технических систем на железнодорожном транспорте.

Уверен, что эта международная конференция вызовет широкий интерес ученых, промышленников и бизнесменов, принесет участникам новые деловые контакты и знакомства, придаст дополнительный импульс процессу инновационного развития стран – участников конференции.

Искренне желаю всем участникам, гостям и организаторам конференции плодотворной работы, новых идей и позитивных перспектив.

С глубоким уважением,

Председатель Совета Российского фонда
фундаментальных исследований
Академик РАН

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'В.Я. Панченко'.

В.Я. Панченко

СЕКЦИЯ №1

**УПРАВЛЕНИЕ ПЕРЕВОЗОЧНЫМ ПРОЦЕССОМ,
ПЛАНИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПЕРЕВОЗОК**

Матюхин В.Г., Шабунин А.Б., ОАО «НИИАС», г. Москва

Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте – 2014

В состав ИСУЖТ входят комплексы задач, максимально покрывающие технологический цикл эксплуатационной работы, включая формирование нормативного и вариантного графика, планирование поездной и станционной работы на многосуточном и сменно-суточном горизонте с учетом состояния заявок на перевозку. Сформированный график движения поездов взаимосвязан с планами заставки бригад, подвязки локомотивов, проведения окон и приема-отправления поездов на станциях полигона. На основе этого графика выполняется адаптивное управление движением поездов в реальном времени с возвратом поездов в график движения в случае конфликтных ситуаций. Таким образом, тремя основными комплексами задач ИСУЖТ можно считать: построение нормативного и вариантного графика, управление тяговыми ресурсами и управление пропуском поездопотока.

Комплекс по управлению пропуском поездопотока по расписанию в настоящее время реализован на железнодорожных направлениях Москва – Санкт-Петербург и Санкт-Петербург – Бусловская. В ходе реализации системы полностью подтверждена состоятельность выбранных принципов построения. Диспетчерские решения, традиционно относящиеся к области интуиции, производственного опыта и искусства управления, формализуются средствами ИСУЖТ.

На практике подтверждена возможность автоматического решения конфликтных ситуаций при управлении движением и автоматического построения диспетчерских расписаний с реализацией приоритетов поездов и учета интересов всех участников перевозочного процесса.

В 2014 году идет реализация подобных комплексов для Невельского и Ордежского диспетчерских участков Октябрьской железной дороги и 7-ми диспетчерских участков Восточно-Сибирской железной дороги.

Единые принципы построения системы реализованы и на комплексе задач управления тяговыми ресурсами. Работы по этому комплексу задач ведутся на Восточном полигоне, включающем четыре дороги Восточно-Сибирскую, Красноярскую, Забайкальскую и Дальне-Восточную. Принципиально новым является решение по автоматическому построению нормативного и вариантного графиков движения.

Таким образом, по всем трем упомянутым ранее основным составляющим проекта ИСУЖТ получены практические результаты. Идет процесс внедрения.

Наряду с упомянутыми задачами, в 2014 году в составе проекта ИСУЖТ появилось и новое важное направление. Это реализация задач в интересах ЦФТО.

Опыт внедрения.

Ход опытной эксплуатации разработанных комплексов управляющих задач ИСУЖТ показал, что такого класса задачи требуют более длительного этапа опытной эксплуатации, по сравнению с информационно-справочными задачами, которые в настоящее время в основном реализованы и эксплуатируются в РЖД.

Внедрение интеллектуальных задач в постоянную эксплуатацию и обеспечение высокой эффективности их применения требует длительной и кропотливой совместной работы разработчиков с диспетчерским персоналом и технологами. Требуется совместная работа

как в части формирования в ИСУЖТ достоверных и полных данных, так и для автоматической выработки и оптимизации управленческих решений.

Особое внимание в условиях совместной работы больших коллективов должно уделяться соблюдению базовых принципов проекта. Базовые принципы ИСУЖТ уже докладывались ранее и на конференциях и в тематических статьях. Их соблюдение обеспечивает унификацию решений и дает возможность декомпозиции задач ИСУЖТ на ряд подсистем при гарантии реализации действительно единой системы.

К числу наиболее важных принципов относятся:

- Нисходящая модель проектирования, которая обеспечивает контроль следования идеологии системы, максимальную генерализацию программных компонентов, определение стандартных протоколов взаимодействия и раннее прототипирование пользовательского интерфейса.
- Непрерывность развития и обучения системы, что является необходимым условием проектирования для отрасли с априорной неопределенностью и динамичностью внешней среды.
- Сетевая модель построения как современное средство создания сверхсложных систем за счет декомпозиции и слабосвязанного функционирования компонентов при сохранении единства реализации онтологии, комплексной динамической модели и контура адаптивного планирования.
- Процессный подход, обеспечивающий полноту автоматизации сквозных производственных процессов и исключение дублирования при разработке Системы.
- Реальный масштаб времени, как необходимое условие обеспечения ситуационности, а, следовательно, живучести транспортной системы.

В процессе практической реализации совместно с технологами и диспетчерским аппаратом выяснилось, что ряд сформулированных в ТЗ задач не был достаточно детализирован, как этого требуют сложные системы управляющего класса. Эта работа проводилась уже в ходе опытной эксплуатации. В ходе реализации увеличилось количество источников данных, неоднократно менялся пользовательский интерфейс. Особо значимым является увеличение количества факторов и ограничений для задач планирования. Только в ходе внедрения были добавлены такие факторы, как учет занятости путей вагонами, длин путей, весов поездов и профиля пути, занятости горловины станции, добавлен учет времени на разгон и замедление и многие другие. При том, что все они, безусловно, известны специалистам службы движения, детализация постановки задачи и обеспечение достоверных источников данных выполнялись по мере опытной эксплуатации

системы. Ситуацию усложняют выявляемые в процессе работы ранее неизвестные ошибки систем – поставщиков информации. Доказательство наличия ошибок в таких случаях, когда речь идет про эталонные значения, всегда требует особой тщательности и многократных проверок.

При реализации такой сложной системы как ИСУЖТ еще раз подтвердилась необходимость особого внимания к унификации всех фрагментарных решений.

Так, при реализации подпроектов появляется соблазн пройти по более простому пути, реализовав свои структуры и базы данных. На выходе получив множество разрозненных систем с уникальными архитектурными решениями, не задумываясь о последствиях как сопровождения этих подпроектов, так и коммуникации между разными подпроектами. Попытки таких реализаций препятствуют реализации единой системы и недопустимы.

Другим примером базового принципа является автоматическое адаптивное планирование. Этот принцип определяет суть проекта, ее интеллектуальную составляющую. Это задача колоссальной сложности, которую удалось преодолеть на конкретных задачах. Диспетчерский персонал решает эту задачу в ручном режиме постоянно. Существенным является, что дальнейший охват процесса интеллектуализации отрасли требует глубокого анализа технологами диспетчерской работы на всех этапах производственного процесса, формализация ее и перевод на принципы автоматического адаптивного планирования.

Дорожная карта ИСУЖТ

Говоря про перспективы, необходимо остановиться на дорожной карте ИСУЖТ – это предлагаемая комплексная программа реализации проекта на 2014-2017 годы.

Дорожная карта предлагает последовательную реализацию комплексов задач автоматического формирования графика, управления пропуском поездопотоков по расписанию и управление тяговыми ресурсами на основных направлениях грузопотоков: Кузбасс-Восток, Кузбасс-Север, Кузбасс-Запад, Кузбасс-Юг.

Фактически реализация дорожной карты позволит обеспечить эстафетную передачу поездопотока с одного диспетчерского участка на другой, в соответствии с графиком и согласованного по ресурсам в рамках полигона управления. Реализация программы должна опираться на отработанные в 2013-2014 годах комплексы задач, которые были рассмотрены выше.

Все комплексы представлены типизированными рабочими местами (АРМами) на уровне диспетчерских участков, дорожном и сетевом уровнях. Ключевым

результатом работы комплексов является создание/модификация графиков движения поездов разного горизонта планирования под динамические потребности грузоотправителей и синхронизированные с ними планы по управлению тяговыми ресурсами, работы станций и проведению работ по поддержанию и развитию инфраструктуры.

Обеспечивающие факторы реализации программы:

- Внедрение на главных направлениях высокоточной модели с периодичностью обновления 5 сек.
- Обеспечение мониторинга отклонения от графика;
- Обеспечение формирования актуального графика движения поездов с специализированным расписанием выделенных (дорогих) поездов;
- Интеллектуальный комплекс по построению графика для решения конфликтных ситуаций, автоматической подвязки подходов и построению диспетчерского расписания.

Реализация дорожной карты обеспечивает возможность перейти к качественно новому уровню функциональности – реализации логистики реального времени.

Логистика реального времени.

В динамике рыночных механизмов последних лет грузовладелец требует более высокого уровня обслуживания, доступности перевозки, дополнительных опций к базовой услуге, и, прежде всего, в организации доставки груза в срок. Вне зависимости от технологической возможности доставки и необходимости заблаговременной подачи заявки на перевозку. Реализация принципа клиентоориентированности в современных условиях требует пообъектного мониторинга и планирования как поездов, локомотивов, бригад, так и вагонов.

На основе реализованных комплексов задач ИСУЖТ может обеспечить поддержку таких логистических продуктов, как:

- пропуск транзитного поездопотока;
- обеспечение контейнерных и контрейлерных перевозок;

- контроль и гарантированный пропуск специализированных, «дорогих», поездов;
- согласованный подвод к портам и крупным объектам выгрузки;
- обеспечение подвода порожних вагонов к пунктам (станциям) массовой погрузки и другие.

Требование реального времени в этих условиях является принципиальным и напрямую связано с обеспечением эффективного использования ресурсов.

Важным требованием является ситуационность управления для обеспечения надежности и живучести транспортной системы. Перепланирование в этих случаях должно осуществляться «на лету», без останова и перезагрузки системы и планирования с начала.

Стихийность несогласованных корректировок, связанных с грузом, вагонами, тяговыми ресурсами и работой станций видится совершенно недопустимой. Оперативное регулирование эксплуатационной работы должно быть комплексным и взаимоувязанным по всем причастным службам. Что и обеспечивается при реализации изложенной выше дорожной карты.

Обеспечивающим фактором является пообъектное планирование и мониторинг движения грузов путем реализации вагонной модели, синхронизированной с поездной, локомотивной и бригадной моделями. Для достижения этой цели обеспечивается увязка в рамках единой идеологии процессов планирования поездной работы, тяговых ресурсов, реализация работы с заявками в ИСУЖТ во взаимодействии с ЦФТО и системой ЭТРАН.

Заключение.

Реализация всего комплекса мероприятий в рамках ИСУЖТ необходима для внедрения на сети инновационных технологий организации движения поездов по графику, охватывающих все элементы производственного процесса. Оптимизация грузового движения открывает дополнительные возможности для сокращения издержек железнодорожного транспорта, создания резерва пропускной способности, доставки грузов в установленные сроки и, как следствие, более качественное обслуживание клиентов РЖД.

Архипов Д.И., Лазарев А.А., ИПУ РАН им. В.А. Трапезникова, г. Москва

Минимизация максимального взвешенного временного смещения для заказов на доставку грузов между двумя станциями в условиях ограниченного движения составов

Введение

Имеются две станции, соединенные двухпутной железной дорогой. Необходимо выполнить множества заказов $N = \{J_1, \dots, J_n\}$ и $N = \{J_1^2, \dots, J_m^2\}$ на поставку грузов между станциями. Заказы множества N^1 необходимо доставить с первой станции на вторую, а заказы множества N^2 со второй на первую. Каждый заказ состоит из одного вагона. Все вагоны одинаковые. Так как железная дорога двухпутная, то расписания для множества N^1 и N^2 мы можем составить отдельно. Рассматриваемое множество, не умаляя общности, обозначим за $N = \{J_1, \dots, J_n\}$. Пусть r_i – момент поступления заказа J_i на станцию. Без потери общности предположим, что заказы пронумерованы в порядке их поступления. Каждый заказ имеет свою ценность $w_j > 0$.

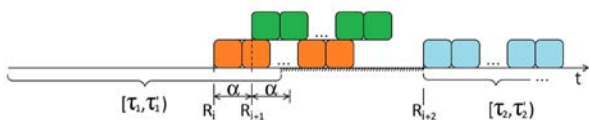


Рис. 1: Допустимые интервалы отправки

Доставка вагонов с одной станции на другую осуществляется поездам T_1, T_2, \dots, T_q отправляющимися в моменты времени R_1, R_2, \dots, R_q и состоящими из k_1, k_2, \dots, k_q вагонов соответственно. Обозначим за p время движения состава между станциями, а за α – время, которое должно разделять моменты отправки двух поездов. Движение пассажирских поездов и плановые работы учитываются в предложенной модели с помощью допустимых интервалов отправки $[r_1, r_2), \dots, [r_z, r_z)$ (рис. 1). Поезда могут быть отправлены только в момент времени, принадлежащий одному из этих интервалов. Множество всех расписаний, в которых все заказы отправляются после своих моментов поступления и все поезда отправляются не мешая друг другу в допустимые интервалы, обозначим за Π . Для каждого заказа определён директивный срок $d_j = r_j + \delta$ – момент времени, до которого заказ может быть доставлен на станцию назначения без опоздания, где δ – запас времени на доставку. Пусть C_j – время доставки заказа J_j . Временное смещение заказа обозначим за $L_j = C_j - d_j$. Тогда целевая функция задачи записывается как:

$$\min_{\pi \in \Pi} \max_{j=1, n} w_j L_j$$

Задача минимизации общего времени выполнения заказов при ограничении на максимальное взвешенное временное смещение

Решим вспомогательную задачу. Дано множество заказов N и положительное число y . Задача заключается в составлении расписания $\Theta(N, y)$, удовлетворяющего условию:

$$\min_{\pi \in \Pi, i=1, q} R_i(\pi) \mid \max_{j=1, n} w_j L_j < y$$

Введем дополнительные обозначения. Для данного значения ограничения y для каждого заказа J_j может быть определен момент времени t'_j до которого данный заказ должен быть отправлен. Из ограничения на максимальное временное смещение имеем: $y > w_j(C_j - d_j) = w_j(C_j - r_j - \delta) \Rightarrow C_j < \frac{y}{w_j} + r_j + \delta$. Так как после отправки работы требуется ещё некоторое время pp , чтобы она доехала до станции назначения, то получаем условие на момент отправки работы j :

$$C_j - p < \frac{y}{w_j} + r_j + \delta \Rightarrow t'_j = \frac{y}{w_j} + r_j + \delta - p \text{ (рис. 2).}$$

Заметим, что для любого значения δ и любого множества значений w_j мы можем свести данную задачу к задаче с весами w'_j и $\delta' = 0$ таким образом, что у каждой работы j моменты обязательной отправки t'_j будут теми же. Это может быть получено благодаря преобразованию весов:

$$t'_j = \frac{y}{w_j} + r_j + \delta = \frac{y}{w_j} + r_j \Rightarrow \frac{y}{w_j} + \delta = \frac{y}{w'_j} \Rightarrow w'_j = \frac{y}{\frac{y}{w_j} + \delta}$$

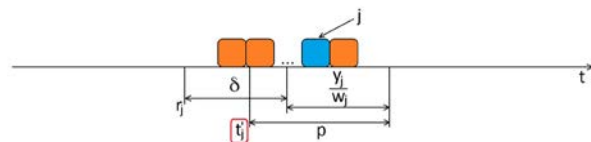


Рис. 2: Момент обязательной отправки

Таким образом, задача может быть сформулирована следующим образом: имеется множество из

$$n = \sum_{i=1}^q k_i$$

заказов, для каждого из которых определены момент поступления r_j и момент обязательной отправки t'_j . Цель – перевезти заказы на q поездах, каждый из ко-

торых тратит на дорогу время p так, чтобы каждый заказ был отправлен на поезде, отправляющемся в промежутке $R_m \geq [\max(r(T_m), T_{m-1} + \alpha)]$, и составленное расписание удовлетворяло целевой функции.

Введем функцию $[*]$, определённую на множестве моментов времени t . Для любого момента времени t , значение функции равно:

$$[t_i] = \min_{t \in [\tau_1, \tau_1], \dots, [\tau_z, \tau_z], t \geq \tau_i} t,$$

т.е. $[t_j]$ – минимальный момент времени, превышающий t_j , принадлежащий одному из допустимых интервалов отправки.

Введем функцию $r(U)$, определённую на множестве заказов. Для любого множества заказов U значение функции равно: $r(U) = \max_{j \in U} r_j$, т.е. данная функция возвращает момент времени, к которому поступят все заказы из данного множества.

Введем семейство множеств $S_1 \subset S_2 \subset \dots \subset S_q$ – работы, которые должны уехать первым поездом (S_1), первым или вторым поездом (S_2), первым или вторым или третьим (S_3) и т.д. Для любого $i=1, n$ мощность множества (S_i) не может превышать количество заказов, которое можно увезти первыми i поездами, т.е. $|S_i| \leq \sum k_i = K_i$. Заметим, что до начала работы алгоритма построения $\Theta(N, y)$ не пусто только множество S_q , которое состоит из всех n работ. Будем говорить, что расписание π удовлетворяет набору множеств S_1, \dots, S_q , если $\forall i=1, n \ i=1, n$ выполняется $S_i \in T_1(\pi) \dots \cup T_i(\pi)$.

Рассмотрим дополнения $\bar{S}_i = N \setminus S_i$ ко множествам S_1, \dots, S_q . Из определения множества S_i следует, что любой поезд, с номером больше чем i должен состоять только из заказов, принадлежащих множеству \bar{S}_i , т.е. $\forall l, q \geq l > i : T_l \subset \bar{S}_i$.

В расписании $\Theta(N, y)$ отправка поезда T_m в момент времени R_m должна удовлетворять следующим свойствам:

После отправки m -ого поезда все заказы из множества S_m должны быть отправлены, т.е. $S_m \subseteq T_1 \cup \dots \cup T_m$;

К моменту поступления $r(T_m)$ заказов из T_m должны поступить хотя бы k_m заказов, в том числе все заказы из S_m , т.е. $r(T_m) \geq \max(r(S_m), r_{K_m})$;

Момент времени R_m , определенный для поезда T_m , удовлетворяет следующему неравенству: $R_m \geq [\max(r(T_m), T_{m-1} + \alpha)]$.

Свойство 1 следует из определения S_m .

Свойство 2 следует из того, что для отправки первых m необходимо, чтобы поступило хотя бы K_m заказов и поступили все заказы из S_m , чтобы было выполнено свойство 1.

Свойство 3. Поезд m не может быть отправлен до того момента, как:

- поступят все работы из T_m ;
- $m-1$ -ый поезд освободит пути;

- момент времени будет принадлежать допустимому интервалу отправки.

Алгоритм построения расписания $\Theta(N, y)$

Алгоритм 1. На первом шаге рассматриваем формирование последнего поезда T_q . Учитывая, что $T_q \subseteq S_{q-1}$, выбираем из множества S_{q-1} k_q заказов с наибольшими значениями моментов поступления r_j и включаем их в поезд $T_q = \{J_{q_1}, J_{q_2}, \dots, J_{q_{k_q}}\}$, после чего переходим к формированию поезда T_{q-1} .

Так как один заказ не может быть включен в два разных поезда, то в поезд T_{q-1} могут войти только заказы из $T_{q-1} \subseteq (S_{q-2} \setminus T_q)$, не включенные в T_q , т.е. $\forall J_j \in T_i : t_j \geq R_i$. Выбираем k_{q-1} заказов из множества $(S_{q-2} \setminus T_q)$ и включаем их в T_{q-1} . На каждом следующем шаге поступаем аналогично. Таким образом, при формировании поезда T_j мы выбираем k_j заказов с наибольшими моментами поступления из множества $S_{i-1} \setminus (T_{i+1} \cup T_{i+2} \cup \dots \cup T_q)$ и включаем их в T_i .

После того, как все поезда сформированы, вычисляем их моменты отправки R_i , пользуясь свойством 3. Последовательно находим значения $R_1 = [\max(r(T_1))], \dots, R_q = [\max(r(T_q), T_{q-1} + \alpha)]$. Поочередно проверяем все заказы на выполнимость условия отправки: $\forall J_j \in T_i : t_j \geq R_i$. В случае, если все заказы удовлетворяют данному условию, считаем расписание π , удовлетворяющее целевой функции, найденным, после чего алгоритм прерывает свою работу. В случае, если обнаружены один или несколько заказов J_1, J_2, \dots, J_l , отправляемых в поездах $T_{i_1}, T_{i_2}, \dots, T_{i_l}$ соответственно, для которых t_j меньше либо равно моментам отправки их поездов, для каждого из таких заказов выполняется процедура включения во множества $S_{i-1}, S_{i-2}, \dots, S_1$ соответственно. Так как $S_1 \subseteq S_2 \subseteq \dots \subseteq S_q$, после включения каждого заказа J_x во множество S_{i_x} происходит включение заказа J_x во все множества S_{i_x+1}, \dots, S_q (рис. 3). В те множества, в которых J_x уже состоит, повторного включения не происходит.

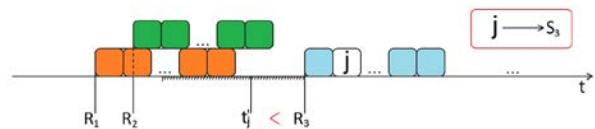


Рис. 3: Включение заказа j в S_3

После того, как включение выполнено и новые множества S_1, S_2, \dots, S_q составлены, проверяем их мощность. В случае, если мощность какого-либо множества превысила допустимое значение, т.е. $|S_i| > K_i$, алгоритм прерывается, делается вывод, что расписания, удовлетворяющего заданной целевой функции, не существует. Если мощности всех множеств корректны, алгоритм повторяет свое действие до тех пор, пока не будет найдено расписание без включений в S_i или пока

одно из множеств S_i не переполнится.

Лемма 1. Даны множества S_1, S_2, \dots, S_q . Для данного набора множеств алгоритм 1 сформировал поезд $T_1(\pi), T_2(\pi), \dots, T_q(\pi)$ и вычислил моменты отправки $R_1(\pi), R_2(\pi), \dots, R_q(\pi)$. Тогда, для любого расписания π' , удовлетворяющего множествам S_1, S_2, \dots, S_q , для любого номера поезда $i \in 1, \dots, q$ верно неравенство: $R_i(\pi) \leq R_i(\pi')$.

Доказательство. Будем сравнивать составы поездов расписаний π и π' , перебирая их в обратном порядке. Пусть на каком-то шаге, в поезде $T_i(\pi)$ нашелся заказ J_x , который отсутствует в $T_i(\pi')$. В таком случае в поезде $T_i(\pi')$ должен присутствовать заказ J_v , который отсутствует в $T_i(\pi)$.

Заметим, что при предыдущих сравнениях различий обнаружено не было, т.е.

$$T_{i+1}(\pi) \equiv T_{i+1}(\pi'), \dots, T_q(\pi) \equiv T_q(\pi').$$

Из того, что заказ J_x имеется во множестве $T_i(\pi)$, но отсутствует во множествах $T_i(\pi')$, $T_{i+1}(\pi'), \dots, T_q(\pi')$ следует, что он состоит во множестве $T_a(\pi')$, где $a < i$. Аналогичные рассуждения проводим для заказа J_v , делая вывод, что J_v содержится во множестве $T_b(\pi)$, где $b < i$. Заметим, что так как при формировании поезда $T_i(\pi)$ алгоритм 1 выбирал заказы с наибольшими значениями r_j , можно сделать вывод, что $r_x \geq r_v$, и так как $J_x \in T_a(\pi')$, то $R_a(\pi') \geq r_x \geq r_v$.

Кроме того, $J_x, J_v \in S_{i-1}$, так как оба расписания удовлетворяют набору множеств S_1, S_2, \dots, S_q . Отсюда следует, что в расписании π' можно поменять заказы J_x и J_v местами без сдвига моментов отправки поездов $R_1(\pi'), R_2(\pi'), \dots, R_q(\pi')$, и расписание будет удовлетворять набору множеств S_1, S_2, \dots, S_q . Последовательно выполняя аналогичные операции, получаем расписание π'' , удовлетворяющее S_1, S_2, \dots, S_q с поездами $T_1(\pi), T_2(\pi), \dots, T_q(\pi)$ и моментами отправки $R_1(\pi'), R_2(\pi'), \dots, R_q(\pi')$. Из свойства 3 следует, что $\forall i = 1, n: R_i(\pi'') \geq [\max(r(T_i), T_{i-1} + \alpha)] = R_i(\pi)$, т.е. $R_i(\pi') = R_i(\pi'') \geq R_i(\pi)$. Лемма доказана.

Теорема 1. Алгоритм 1 строит расписание $\Theta(N, \gamma) \in \Pi$, удовлетворяющее критерию

$$\min_{\pi \in \Pi, i=1, q} R_i(\pi) \mid \max_{j=1, n} w_j L_j < \gamma$$

Если алгоритм 1 прервал свою работу, то не существует такого расписания π , для которого верно $(wL)_{\max} < \gamma$.

Доказательство. Пусть существует расписание π^* удовлетворяющее критерию

$$\min_{\pi \in \Pi, i=1, q} R_i(\pi) \mid \max_{j=1, n} w_j L_j < \gamma$$

Сформируем для него множества

$$S_1(\pi^*), S_2(\pi^*), \dots, S_q(\pi^*)$$

с помощью операции включения:

$$S_i(\pi^*) = \{J_i, \dots, J_{ii}\} - \text{все заказы, для которых вы-}$$

полнено неравенство $R_{i+1}(\pi^*) > t'_j$.

Рассмотрим работу алгоритма 1. Будем строить расписание π , пока $\forall i = 1, \dots, n$ выполняется $S_i(\pi) \subseteq S_i(\pi^*)$. Если алгоритм закончит свою работу, и данное условие будет выполнено, то, по лемме 1, построенное расписание будет удовлетворять критерию

$$\min_{\pi \in \Pi, i=1, q} R_i(\pi) \mid \max_{j=1, n} w_j L_j < \gamma$$

Предположим, что на каком-то шаге нарушилось условие, и для какого-то $i \in 1, \dots, n$ стало верно $S_i(\pi) \not\subseteq S_i(\pi^*)$. Это значит, что в расписании π , построенном на данном шаге алгоритма, $\exists J \in T_i(\pi)$, где $R_{i+1}(\pi) > t'_j$, причем $J \notin S_i(\pi^*)$. Заметим, что так как расписания π и π^* удовлетворяют $S_1(\pi), S_2(\pi), \dots, S_q(\pi)$, то по лемме 1 $R_{i+1}(\pi^*) \geq R_{i+1}(\pi) > t'_j$, следовательно, заказ $J \in S_i(\pi^*)$ – противоречие.

Алгоритм построения оптимального расписания

Алгоритм 2. Для построения оптимального расписания $\pi(N)$ будем действовать следующим образом. Построим расписание, в котором заказы отправляются по возрастанию моментов поступления. Тем самым мы получим расписание, удовлетворяющее условию минимума R_i для каждого поезда i . Рассмотрим заказ, на котором достигается максимум целевой функции $(w_j L_j)$. Пусть этот заказ в данном расписании отправляется m_1 -ым поездом. Так как алгоритм 1 строит расписание с минимальными моментами отправками поездов из всех возможных, удовлетворяющих критерию $(wL)_{\max} < \gamma$, то при уменьшении значения γ для существования расписания необходимо, чтобы заказ, на котором была достигнута целевая функция, был отправлен поездом с меньшим порядковым номером. Следовательно, для того, чтобы улучшить целевую функцию, необходимо отправить заказ j одним из поездов, отправившимся до поезда с номером m_1 , то есть мы должны включить работу j во множество S_{m_1-1} . Это значит, что если мы построим расписание $\Theta(N, w_{j_1} L_{j_1})$, то в нем заказ j будет отправлен одним из поездов, номер которого меньше m_1 , а целевая функция будет меньше, чем $w_{j_1} L_{j_1}$ и достигается на заказе j_2 , который отправлен поездом m_2 . Следующим шагом мы строим расписание $\Theta(N, w_{j_2} L_{j_2})$, в котором заказ j_2 должен быть отправлен поездом с номером меньше, чем m_2 , а значит заказ j_2 попадет во множество S_{m_2-1} . Будем повторять эту процедуру до тех пор пока не наступит такой шаг s , что расписания $\Theta(N, w_{j_s} L_{j_s})$ не существует. После чего говорим, что не существует расписания со значением целевой функции меньше, чем $w_{j_s} L_{j_s}$ и при этом существует расписание, полученное на s -м шаге со значением целевой функции $w_{j_s} L_{j_s}$, следовательно оно и будет оптимальным.

Теорема 2. Алгоритм 2 строит расписание π^* , оптимальное по критерию $(wL)_{\max}$ и имеющее минималь-

ные моменты отправки всех поездов R_i среди всех расписаний с таким значением $(wL)_{\max}$.

Доказательство. Расписание $\pi^* = \Theta(N, y)$ имеет значение целевой функции, равное y' . Из несуществования расписания $\Theta(N, y')$ по теореме 1 следует, что расписаний, удовлетворяющих критерию $(wL)_{\max} < y'$, не существует, а значит расписание π^* оптимально по критерию $(wL)_{\max}$. Из леммы 1 следует, что расписание $\pi^* = \Theta(N, y)$ имеет минимальные моменты отправки всех поездов R_i среди всех расписаний со значением целевой функции $(wL)_{\max} < y'$. Теорема доказана.

Оценка сложности алгоритма

На каждом шаге алгоритма 1 происходит добавление заказа в одно или несколько множеств S_1, S_2, \dots, S_{q-1} . Так как алгоритм 1 строит расписание с минимальными моментами отправки из всех, удовлетворяющих критерию $(wL)_{\max} < y$, то при уменьшении значения y для существования расписания необходимо, чтобы заказ, на котором была достигнута целевая функция, был отправлен поездом с меньшим порядковым номером. Следовательно, на каждом шаге алгоритма 2 происходит включение заказа, на котором достигнута целевая функция в одно из множеств S_1, S_2, \dots, S_{q-1} , при этом выход заказа из каждого из этих множеств невозможен. Следовательно, суммарное число шагов алгоритмов 1 и 2 не превышает суммы мощностей множеств S_1, S_2, \dots, S_{q-1} , которая равна $K_1 + K_2 + \dots + K_q = O(n^2 / k_{\min})$. На каждом шаге алгоритма 1 выполняется подбор заказов во мно-

жества T_q, T_{q-1}, \dots, T_1 , на каждом шаге рассматривается не более чем K_q, \dots, K_2, K_1 заказов-кандидатов соответственно. Следовательно, сложность шага алгоритма 1 равна $K_1 + K_2 + \dots + K_q = O(n^2 / k_{\min})$. Из приведенных рассуждений следует, что общая трудоёмкость алгоритма 2 составляет порядка $O(\frac{n^2}{k_{\min}})$ операций.

Литература

1. B.B.Simons. (1978). A fast algorithm for single processor scheduling. Proceedings of the 19 IEEE Annual Symposium on Foundations of Computer Science (стр. 246-252). New York: Ann. Arbor. Mich.
2. J.A.Hoogeveen. (1996). Minimizing maximum promptness and maximum. Math. Oper. Res., 100-114.
3. А.А.Лазарев. (2008). Теория расписаний. Оценка абсолютной погрешности и схема приближённого решения задач теории расписаний. Москва: МФТИ.
4. Лазарев, А. А., Архипов, Д. И., & Карпов, И. В. (2010). Polynomially Solvable Case of the NP-Hard Problem $1|r_j|L_{\max}$. International Conference on Project Management and Scheduling, (стр. 289-293). Tours.
5. Лазарев, А. А., Архипов, Д. И., & Мусатова, Е. Г. (2012). Задача минимизации максимального взвешенного временного смещения выполнения заказа для двух станций. Труды и пленарные доклады участников конференции УКИ'12 (стр. 1962-1967). Москва: ИПУ РАН.

Цельсова А.Ю., ИПУ РАН им. В.А. Трапезникова, г. Москва
Хоботов Е.Н., МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва

Разработка методики формирования маршрутов и расписаний движения грузовых поездов по железнодорожной сети

Введение

В нашей стране велика роль железнодорожного транспорта. Процесс ценообразования и конкурентоспособность во многом зависят от эффективности его функционирования. Совершенствование технологии работы железных дорог, и главным образом управление работой вагонного парка, является важной задачей для улучшения эффективности функционирования железных дорог России.

К основным процессам управления на железнодорожном транспорте относятся операции с грузовыми вагонами, связанные с погрузкой, сортировкой и формированием, перемещением, выгрузкой и регулированием их продвижения в порожнем состоянии. Для эффективного управления перевозками в отрасли создан и совершенствуется ряд автоматизированных систем, система автоматизированных диспетчерских центров управления перевозками, наращиваются возможности сети информационно-вычислительных центров [1]. Все это направлено на принятие рациональных решений по использованию перевозочных средств. Увеличение эффективности технологии работы с грузовыми вагонами делает железнодорожный транспорт более привлекательным для клиентуры и способствует привлечению грузопотоков.

Для того, чтобы обеспечить стабильность, ритмичность и устойчивость перевозочного процесса в условиях суточной неравномерности перевозок, необходимо оперативное перераспределение порожних вагонов в соответствии с непрерывно меняющейся обстановкой. Поэтому разработка принципов построения моделей и методов, позволяющих своевременно изымать образующие избытки парка на одних сортировочных станциях и компенсировать его недостаток на других, усиливая передачу порожних вагонов либо осуществляя сверхплановую погрузку в адрес соответствующих станций, является важной и актуальной [2-5]. Таким образом, регулирование парка порожних вагонов сводится, в основном, к разработке и реализации системы мер, обеспечивающих перемещение вагонов из районов, имеющих их избыток, в районы с недостатком погрузочных ресурсов.

Постановки задач

Рассмотрим постановку задачи, в которой необходимо выбирать маршруты доставки порожних вагонов с проходящими поездами.

Пусть задана железнодорожная сеть, включающая сортировочные станции. На каждой станции находится заданное количество порожних вагонов, которые требуется доставить к станциям дальнейшей погрузки с проходящими через станцию грузовыми поездами.

Доставка вагонов может осуществляться как одним, так и несколькими поездами путем прицепки соответствующего количества вагонов к поезду, проходящему через станцию, отправки и отцепки нужного количества вагонов на станциях назначения или на промежуточных сортировочных станциях, где эти вагоны будут прицепляться к другим поездам, следующим через эту сортировочную станцию позже. С помощью таких поездов ожидающие отправки порожние вагоны без дальнейших перецепок доставляются к станциям погрузки или на наиболее удобные станции для последующей их доставки с проходящими поездами на станции дальнейшей погрузки.

Для железнодорожной сети задана информация о поездах, проходящих по сети. О маршруте каждого поезда известны стоимость его выполнения, станция и время отправления, сортировочные станции, через которые поезд проходит по маршруту, время прибытия на них и отправления, а также конечная станция маршрута и время прибытия на нее. Известны станции дальнейшей погрузки порожних вагонов, а также штраф, выставляемый за простой каждого вагона. В каждый поезд может быть включено не более определенного количества вагонов, а вес перевозимых вагонов не может превышать заданную величину.

В задаче требуется из множества поездов определить такие поезда, которые позволят доставлять порожние вагоны от станций разгрузки до станций дальнейшей погрузки с целью минимизации количества перецепок, сокращения времени доставки, а также минимизации штрафов за простой.

Рассмотрим постановку задачи, в которой необходимо формировать маршруты движения поездов с порожними вагонами для их доставки к станциям погрузки.

Требования к работе железнодорожного транспорта и условия доставки порожних вагонов по железнодорожной сети, а также исходные данные аналогичны используемым данным в предыдущей задаче. Данную модель удобно использовать при большом накоплении порожних вагонов на станциях.

В задаче нужно сформировать маршруты движения поездов с порожними вагонами от станций разгрузки до станций дальнейшей погрузки с целью минимизации количества перецепок, сокращения времени доставки вагонов, минимизации штрафов за простой порожних вагонов. В дальнейшем это позволит наиболее эффективно управлять железнодорожными перевозками и доставлять грузы заказчикам.

Для решения этих задач предлагается использовать идеи и принципы, которые были предложены в [6-7] для решения задач, связанных с формированием маршрутов движения грузовых вагонов от станций отправления к станциям назначения с проходящими поездами, а также задач выбора маршрутов движения поездов по железнодорожной сети заданной конфигурации.

В этих работах предлагалось использовать для описания изменения количества вагонов в составе каждого поезда после прохождения сортировочной станции и изменения количества вагонов на сортировочных станциях после прохождения каждого поезда уравнения движения, которые строятся по аналогии с уравнениями, применяемыми в теории и методах управления дискретными системами и процессами [8-9].

Модель определения маршрутов сбора порожних вагонов с проходящими поездами

Рассмотрим принципы построения моделей для решения задачи, в которой необходимо выбирать маршруты доставки порожних вагонов с проходящими поездами.

Для решения этой задачи строится оптимизационная модель, принципы формирования которой основаны на использовании идей и принципов теории математического программирования [10-12] и управления дискретными процессами [8-9].

Изменение количества вагонов в составе q -го поезда после прохождения l -й станции могут быть представлены уравнением следующего вида:

$$U_q(l+1) = U_q(l) + \tilde{u}_q(l) - \tilde{v}_q(l), \tag{1}$$

$$U_q(l_{0q}) = 0, \quad U_q(n_q + 1) = 0, \tag{2}$$

$$0 \leq U_q(l) \leq L, \quad l = 1, \dots, n_q, \tag{3}$$

Где $U_q(l+1)$ – количество вагонов в поезде q после отправки с l -й станции; $U_q(l)$ – количество вагонов в поезде q перед прибытием на l -ю станцию; $\tilde{u}_q(l)$ – количество порожних вагонов, которые подцепляются к поезду q на l -й станции; $\tilde{v}_q(l)$ – количество порожних вагонов, которые отцепляются от поезда q на l -й станции; $U_q(l_{0q})$ – количество вагонов в поезде q на станции, которая является станцией отправления для q -го поезда, L – максимальное количество вагонов, которое может содержать любой поезд, где l_{0q} – станция

отправления q -го поезда, n_q – конечная станция маршрута q -го поезда.

Кроме количества вагонов в q -м поезде необходима также информация о типе вагона (с грузом или порожний), станции отправления и назначения каждого вагона в поезде, а также о ценности и весе вагона. Эта информация необходима для отцепки нужных вагонов на станции, через которую проходит поезд, и включения в состав поезда вагонов, ожидающихся на станции отправки, чтобы не нарушить ограничений на вес поезда.

Вес груза, который может перевозить любой поезд, не должен превышать заданной величины P . В связи с этим в модель вводится ограничение:

$$\sum_{j \in S_{lq}} \sum_{r=1}^M \sum_{h=1}^H \sum_{f=1}^F \tilde{U}_{qf}^{jrh} (l+1) p_f - P \leq 0, \tag{4}$$

где p_f – вес вагона f -й весовой категории.

Уравнения, определяющие изменения в количестве грузовых и порожних вагонов на станциях после прохождения поездов, строятся таким же образом, как и уравнения динамики в теории управления дискретными процессами. Однако динамика в изменении количества грузовых и порожних вагонов на станциях после прохождения поездов в отличие от ранее рассмотренных уравнений динамики определяется порядком прохождения каждой станции поездами разных маршрутов.

На l -й станции не может храниться больше заданного количества вагонов \hat{W}_l , поэтому в модель вводятся ограничения следующего вида:

$$\sum_{j \in J_{lq}} \sum_{r=1}^M \sum_{h=1}^H \sum_{f=1}^F W_{lhf}^{qjr} (k) \leq \hat{W}_l, \quad l = 1, \dots, M, \quad k = 1, \dots, N_l. \tag{5}$$

Количество вагонов, которые можно отцеплять от поездов и прицеплять к ним на сортировочных станциях не может превышать определенной величины, поскольку имеются ограничения на максимальное количество вагонов, которое может содержать любой поезд, а также ограничения на максимальный вес поезда и на количество вагонов, хранящихся на станциях.

Для того, чтобы минимизировать штрафы, связанные с недоставленными заказчиком порожними вагонами, в модель включаются ограничения:

$$a_{ij}^{hf} - \sum_{q \in S_j} v_{qf}^{jih} (j) - y_{ij}^{hf} = 0, \tag{6}$$

а в оптимизируемом функционале минимизируется следующая сумма

$\sum_{j=1}^M \sum_{l=1}^M \sum_{h=1}^H \sum_{f=1}^F y_{lj}^{hf}$, где y_{lj}^{hf} – вспомогательные переменные ($y_{lj}^{hf} \geq 0$), определяющие количество вагонов, которые не удалось доставить заказчиком на станцию j со станции l .

Оптимизируемый функционал для такой модели может быть представлен в следующем виде:

$$F = \max \left\{ \begin{aligned} & \alpha_1 \sum_{h=1}^H \sum_{f=1}^F \sum_{l=1}^M \sum_{\substack{q \in S_l \\ l \neq j}}^M \sum_{\substack{j=1 \\ l \neq j}}^M C_{ij}^{hf} v_{qf}^{jlh} (j) - \\ & - \alpha_2 \sum_{l \in R_G} \sum_{f=1}^F \sum_{h=1}^H \sum_{\substack{j=1 \\ r=1 \\ r \neq j \\ r \in R_G}}^M \tilde{c}_{fh} v_{qf}^{jrh} (l) - \\ & - \alpha_3 \sum_{j=1}^M \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq r}}^M \sum_{h=1}^H \sum_{f=1}^F \hat{c}_{lj}^{hf} y_{lj}^{hf} \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

где $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – весовые коэффициенты, \tilde{c}_{fh} – затраты на отцепку порожних вагонов от одного поезда на сортировочных станциях для ожидания «нужного» поезда и прицепку к этому поезду, \hat{c}_{lj}^{hf} – штраф за срыв доставки одного вагона h -й категории ценности и f -й весовой категории со станции отправления l на станцию назначения j .

Все переменные модели неотрицательны, т.е. все величины $U_{lq}, \tilde{u}_{lq}, \tilde{v}_{lq}, \tilde{U}_{qf}^{lrh} (l), v_{qf}^{jrh} (l), y_{lj}^{hf}$ могут принимать значения только большие или равные нулю. Расчеты модели сводятся к решению задачи линейного программирования с булевыми переменными.

В результате расчета модели определяются поезда, которые позволят доставлять порожние вагоны от станций разгрузки до станций дальнейшей погрузки с целью минимизации количества перецепок, сокращения времени доставки, а также минимизации штрафов за простой.

Модель формирования маршрутов сбора порожних вагонов

Рассмотрим принципы построения моделей для решения задачи, в которой необходимо формировать маршруты движения поездов с порожними вагонами для их доставки к станциям погрузки.

Для решения данной задачи также строится оптимизационная модель, принципы формирования которой основаны на использовании уравнений и идей, описанных в предыдущем пункте для решения задачи, в которой требуется выбирать маршруты доставки порожних вагонов с проходящими поездами.

Изменения количества вагонов в составе каждого поезда q после прохождения сортировочной станции l предлагается описывать с помощью уравнений движения, которые аналогичны уравнениям (1). Однако ограничения на количество вагонов в поезде q для этой модели имеют следующий вид:

$$0 \leq U_q(l) z_q \leq L, 0 \leq \tilde{u}_q(l) z_q \leq L, l = 1, \dots, n_q, \quad (8)$$

где z_q – булевы переменные типа $\{0,1\}$.

Уравнения, которые определяют изменения количества вагонов и их типов в составе q -го поезда имеют такой же вид, как и в предыдущей задаче.

Ограничение на вес груза, который может перевозить любой поезд, имеет вид (4). Ограничения на количество вагонов, которые могут храниться на станциях в ожидании «подходящих» поездов, имеют вид (5).

Оптимизируемый функционал для такой модели имеет следующий вид:

$$F = \max \left\{ \begin{aligned} & \alpha_1 \sum_{h=1}^H \sum_{f=1}^F \sum_{l=1}^M \sum_{\substack{q \in S_l \\ l \neq j}}^M \sum_{\substack{j=1 \\ l \neq j}}^M C_{ij}^{hf} v_{qf}^{jlh} (j) \\ & - \alpha_2 \sum_{l \in R_G} \sum_{f=1}^F \sum_{h=1}^H \sum_{\substack{j=1 \\ r=1 \\ r \neq j \\ r \in R_G}}^M \tilde{c}_{fh} v_{qf}^{jrh} (l) - \\ & - \alpha_3 \sum_{q=1}^Q b_q z_q - \alpha_4 \sum_{j=1}^M \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq r}}^M \sum_{h=1}^H \sum_{f=1}^F \hat{c}_{lj}^{hf} y_{lj}^{hf} \end{aligned} \right\}, \quad (9)$$

где α_i – весовые коэффициенты ($i=1, \dots, 4$), b_q – стоимость движения поезда q по соответствующему маршруту на железнодорожной сети. Все переменные модели неотрицательны. Расчеты данной модели сводятся к решению задачи целочисленного линейного программирования.

В результате расчета модели формируются маршруты движения поездов с порожними вагонами от станций разгрузки до станций дальнейшей погрузки с целью минимизации количества перецепок, сокращения времени доставки вагонов, минимизации штрафов за простой порожних вагонов.

Таким образом, фактически определяется маршрут движения каждого порожнего вагона от станции разгрузки до станции дальнейшей погрузки. При этом выполняются ограничения на количество и вес вагонов в каждом поезде, а также на количество вагонов на станциях, на которых происходит перецепка вагонов с одного поезда на другой.

Величины $U_{lq}, \tilde{u}_{lq}, \tilde{v}_{lq}, \tilde{U}_{qf}^{lrh} (l), v_{qf}^{jrh} (l), y_{lj}^{hf}$ выбираются таким образом, чтобы максимизировать доход, получаемый от своевременной доставки порожних вагонов на станции погрузки и минимизировать затраты на количество перецепок на станциях, где порожние вагоны дожидаются «подходящих» поездов, а также минимизировать штрафы за несвоевременную доставку порожних вагонов на станции дальнейшей погрузки.

Программная реализация системы

Компьютерную систему, позволяющую решать рассмотренные выше задачи, предлагается строить по модульному принципу. Каждый модуль такой системы выполняет определенные функции. В состав системы включены следующие модули:

- Модуль ввода исходных данных
- Модуль выбора моделей решения описанных выше задач

- Модуль расчета сформированных моделей
- Модуль автоматизации движения вагонов
- Модуль сбора, хранения и отображения информации, полученной в результате расчетов моделей и редактирования маршрутов.

С использованием предложенных в статье моделей было решено более тридцати задач, связанных с выбором и формированием маршрутов сбора порожних вагонов для их доставки к станциям погрузки. Проведенные расчеты задач показали, что с использованием разработанных моделей удастся достаточно быстро определять такие поезда, которые позволят производить сбор порожних вагонов от станций разгрузки до станций дальнейшей погрузки, а также достаточно быстро формировать маршруты движения поездов с порожними вагонами от станций разгрузки до станций дальнейшей погрузки.

Результаты использования предлагаемых моделей и пакета численных методов оптимизации GLPK могут быть представлены на примере решения следующей задачи.

Пусть задана железнодорожная сеть, которая включает 50 сортировочных станций. На каждой станции находится заданное количество порожних вагонов от 0 до 30 штук, которые требуется доставить к станциям загрузки с проходящими через станцию поездами. Для каждого вагона известен штраф за несвоевременную доставку. По сети в соответствии с заданным расписанием и маршрутами совершают свои рейсы 7 поездов. О маршруте каждого поезда известны: станция и время его отправления, сортировочные станции, через которые поезд проходит по маршруту, время прибытия на них и отправления, а также станция назначения и время прибытия на нее. В состав каждого поезда может входить не более 40 вагонов.

В задаче требовалось определить маршруты движения поездов с порожними вагонами от станций разгрузки до станций дальнейшей погрузки, таким образом, чтобы минимизировать количество перцепков, сократить время доставки порожних вагонов, минимизировать штрафы за простой и за несвоевременную доставку к станциям погрузки. Расчеты задачи использовали 400 Мб оперативной памяти и заняли 80 секунд. В результате решения задачи были определены маршруты движения каждого порожнего вагона с проходящими поездами, станции, на которых производилась их перцепка с одного поезда на другой, если это требовалось, а также информация о порожних вагонах, которые не удалось вовремя на станции дальнейшей загрузки.

Заключение

Целью реформирования железнодорожного транспорта является повышение эффективности его работы, доступности, качества предоставляемых им услуг. Важно формирование единой, гармоничной транспортной системы, снижение совокупных народно-хозяйственных затрат на перевозки грузов и оптимальный сбор порожних вагонов, а также удовлетворение растущего спроса на услуги, предоставляемые железнодорожным транспортом.

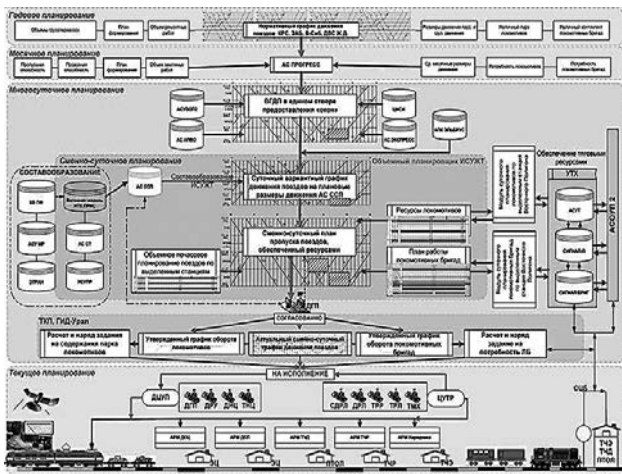
Литература:

1. Ковалев В.И., Елисеев С.Ю., Осьминин А.Т. Управление парками вагонов стран СНГ и Балтии на железных дорогах России: учебное пособие для вузов железнодорожного транспорта – М.: Маршрут, 2006, С. 5-17.
2. Лапидус Б.М. Повышение производительности и эффективности железнодорожного транспорта на инновационной основе / Вестник ВНИИЖТ, 2012, № 5, С. 3-6.
3. Морозов В.Н. Поиск оптимальной технологии / Пульс управления, 2012, № 5, С. 6-9.
4. Большие маневры / Пульс управления, 2012, № 5, С. 10-13.
5. Виксне Д. Компромисс порядка. Минтранс, РЖД и операторы едины в оценке мер по управлению парком / Гудок, 2012, № 41, С. 4.
6. Хоботов Е.Н., Цельсова А.Ю. Модель формирования маршрутов движения вагонов от станций отправления грузов до станций назначения. Труды Второй научно-технической конференции «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте» (ИСУЖТ-2013), 21-22 октября 2013 г., Москва, С. 87-88.
7. Хоботов Е.Н., Цельсова А.Ю. О выборе маршрутов движения поездов и вагонов при доставке грузов по железнодорожной сети. Тезисы Четвертой международной научно-практической конференции «Интеллектуальные системы на транспорте». С.-Петербург, 3-4 апреля 2014 г., С. 35-36.
8. Пропой А.И. Элементы теории оптимальных дискретных процессов. М.: Наука, 1973, – 256 с.
9. Болтянский В.Г. Оптимальное управление дискретными системами. М.: Наука, 1973, – 446 с.
10. Поляк Б.Т. Введение в оптимизацию. – М.: Наука, 1983, – 382 с.
11. Галеев Э.М. Оптимизация. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2010, – 336 с.
12. Сухарев А.Г., Тимохов А.В., Федоров В.В. Курс методов оптимизации. – М.: Наука, 1986, – 328 с.

Капустин Н.И., ОАО «НИИАС», г. Москва

Технологическая архитектура принципов управления эксплуатационной работой на железной дороге в ПТК ИСУЖТ

Как показала практика, компьютерное и математическое моделирование сложного перевозочного процесса железных дорог невозможно без учета технологических принципов управления производственными процессами всех предприятий, причастных к перевозкам и не увязанных их между собой.



Структура планирования ресурсов и производственных процессов на железнодорожном транспорте в ПТК ИСУЖТ

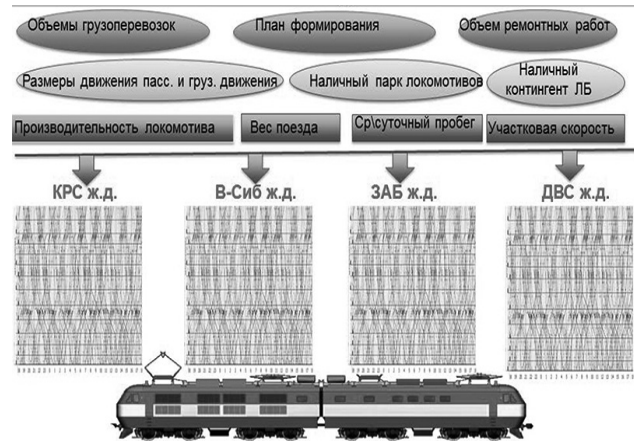
Технология планирования производственных ресурсов в перевозочном процессе на железнодорожном транспорте имеет сложную многоуровневую структуру, которая состоит из нескольких этапов:

- годовое;
- месячное;
- многосуточное;
- сменно-суточное;
- текущее планирование.

Во главу производственного перевозочного процесса в ПТК ИСУЖТ поставлен ГДП. На слайде вы видите, что все стрелки направлены к нему и от него.

Выполнение графика движения поездов – есть основа рационального использования пропускных способностей инфраструктуры и обеспечения единой технологии процесса перевозок.

Приведенный слайд очень сложно воспринимается, по причине значительного множества количеств факторов технического и технологического характера, влияющих на эксплуатационную работу.

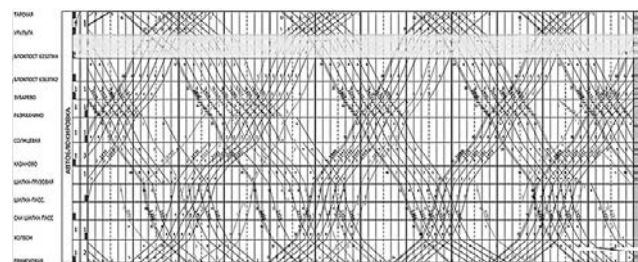


Разработка нормативного графика движения поездов на железных дорогах ВП

Годовое планирование

Над автоматизированной разработкой НГДП и его составляющих (на основе мультиагентных технологий) работает целое отделение ОАО «НИИАС», возглавляемое Абрамовым А.А. доклад, которого мы услышим ниже.

На основании обработки данных НГДП в АС Прогресс прогнозирует аналогичные показатели по месяцам в течение года.



Поступившая в разработку ВГДП на участке Урульга — Зубарево Забайкальской железной дороги

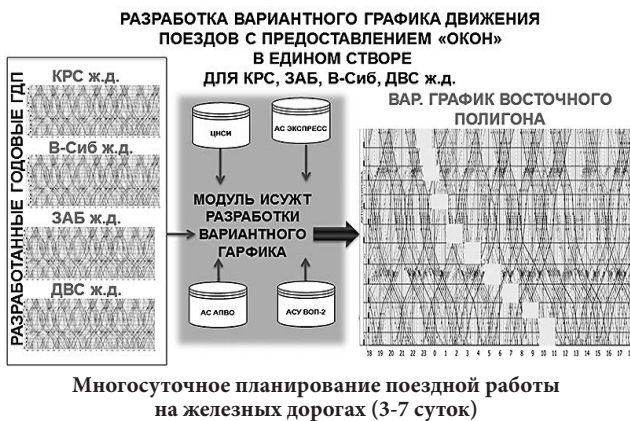
Многосуточное планирование на 3-7 суток

В модуле ПТК ИСУЖТ «ГРАФИК» заложен алгоритм разработки ВГДП с предоставлением «окон» в едином створе (прототип АС ЭЛЬБРУС).

Для его разработки и построения модуль использует информацию:

- на следующие сутки;
- из АС ЭКСПРЕСС – по размерам движения пассажирских поездов;

- из АС АВПО, АС ВОП2 - предоставление «окон» по ремонту инфраструктуры и ограничения скорости;
- суточный ВГДП с каждой железной дороги в LGX;
- на вторые и последующие сутки;
- из АС ЭКСПРЕСС размеры движения пассажирских поездов;
- из АС АВПО, АС ВОП2 - предоставление «окон» по ремонту инфраструктуры и ограничения скорости;
- из АС ПРОГРЕСС - размеры движения;



Полигонный ВГДП не есть основа организации движения поездов по расписанию (АС ЭЛЬБРУС).

Суточное планирование эксплуатационной работы по техническим станциям

Основой для разработки суточного СВГДП служит разработанный МВГДП в едином створе полигона.

В модуль разработки суточного ВГДП по всем техническим станциям ВП поступает откорректированная информация о прогнозных размерах движения из АС ССП. Детализированные актуальные размеры движения транзитных поездов поступают в БД ИСУЖТ из базы данных АСОУП2.



Разработка СВГД поездов с учетом реальных размеров движения

Одновременно с этим специалистами ОАО «НИИАС» разрабатывается модуль ПТК ИСУЖТ «СОСТАВООБРАЗОВАНИЕ» на основе динамической вагонной модели рабочего парка.

Реализация этой задачи позволит автоматизировать процесс составления и необходимость ручного ввода информации в АС ССП отпадет:

- автоматизировать и урегулировать процесс перемещения порожних вагонов;
- сократить их встречные пробеги;
- усовершенствовать технологические процессы управления;
- снизить нагрузку на инфраструктуру от непроизводительного перемещения подвижного состава;
- создать условия для перевозки дополнительных объемов грузов.

На основании поступивших прогнозных размеров движения грузовых поездов из АС ССП (далее из ПТК ИСУЖТ «СОСТАВООБРАЗОВАНИЕ») в ПТК ИСУЖТ реализован модуль суточного расчета нормативной потребности эксплуатируемого парка локомотивов по выделенным участкам тягового полигона, в том числе по депо приписки. Достоверность расчета по нормированию тяги, в т.ч. по мощности локомотивов, зависит от точности прогнозируемых размеров движения поездов по техническим станциям из АС ССП.

Оперативное нормирование

№	Наименование расчетной единицы	1/2/3	4	Потребность, количество												
				МЕЖДУРЕЧЕНСКОЕ ТЯГОВОЕ ПОЛИГОНА			ВОСТОК			ОПЕР. ПУТ.			ВСЕГО			
Итого	Итого	Итого	Итого	Итого	Итого	Итого	Итого	Итого	Итого	Итого	Итого	Итого	Итого			
1	Магистраль - Южная, Крымская АЗ	892	0,864	41	0	16,14	13,76	0	0	0	0	0	0	16,14	13,76	27,9
2	Восточный (Магистраль - Восточный)	690	0,662	41	0	20,86	13,92	0	0	0	0	0	0	20,86	13,92	46,42
3	Магистраль - Забайкальская	714	0,679	41	0	22,2	14,9	0	0	0	0	0	0	22,2	14,9	42
4	Иркутская АЗ	791	0,684	41	0	16,81	11,21	0	0	0	0	0	0	16,81	11,21	29,02
Итого		3087	0	163	0	76	56	0	0	0	0	0	0	76	56	159,34
5	Южная - Петровский Завод, Восточный	368	0,36	41	0	0,97	0,96	0	0	0	0	0	0	0,97	0,96	14,96
6	Табан - Новошахтинск	611	0,602	41	0	20,83	11,64	0	0	0	0	0	0	20,83	11,64	46,46
7	Новошахтинск - Зона	602	0,584	41	0	21,67	10,78	0	0	0	0	0	0	21,67	10,78	46,45
8	Зона - Южный Сортировочный	690	0,662	41	0	34,88	19,93	0	0	0	0	0	0	34,88	19,93	69,89
9	Южный Сорт - Шахтинск	692	0,662	41	0	31,86	7	0	0	0	0	0	0	31,86	7	46,89
10	Шахтинск - Угленар	611	0,605	41	0	30,87	7,8	0	0	0	0	0	0	30,87	7,8	46,87
11	Угленар - Шахта	595	0,577	41	0	15,77	4,26	0	0	0	0	0	0	15,77	4,26	25,71
Итого		423	0	169	0	61	14	0	0	0	0	0	0	61	14	129,34
12	Петровский Завод - Крымская, Заб	427	0,417	41	0	20,36	4,65	0	0	0	0	0	0	20,36	4,65	31,02
13	Копейка	611	0,59	41	0	34,4	6,42	0	0	0	0	0	0	34,4	6,42	44,82
14	Челябинская	629	0,609	41	0	37,23	6,97	0	0	0	0	0	0	37,23	6,97	44,8
Итого		199	0	169	0	14	8	0	0	0	0	0	0	14	8	19,94
15	Крымская - Борзя, Забайкальская АЗ	729	0,693	41	0	6,65	3,34	0	0	0	0	0	0	6,65	3,34	11,99
16	Орловская	641	0,609	41	0	6,47	2,94	0	0	0	0	0	0	6,47	2,94	8,41
Итого		38	0	161	0	11	6	0	0	0	0	0	0	11	6	18,99
Итого		810	0	324	0	129	22	0	0	0	0	0	0	129	22	257,47

Оперативное нормирование локомотивов на тяговых полигонах ВП

Сегодня тестирование показывает, что автоматизированные расчеты по нормированию к фактическому наличию локомотивов на полигонах по отчету ТО32ВЦ расходятся на 3-5% в большую сторону, на такое же количество завышаются размеры движения поездов.

Для окончательного построения СВГДП предъявляемые размеры движения из АС ССП, подкрепленные актуальными данными из АСОУП2 (далее с СЦБ) обрабатываются Объемными планировщиками модуля ПТК ИСУЖТ «ПОЕЗДА» с реализацией предъявленных размеров движения на нитки графика и оптимизацией их в почасовых интервалах по всем техническим станциям ВП.

По результатам работы планировщика «ПОЕЗДА» (по выходной таблице) можно оценить:

- ритмичность работы станции по приему и отправлению транзитных ТР поездов, в т.ч. поездов своего формирования СФ;

- достоверность прогнозного пропуска предъявленных размеров движения;
- фактическую пропускную способность станции (на основании контроля свободности и занятости приемо-отправочных путей на станции, в т.ч. к установленной норме простоя поездов по графику).



Обеспечение тяговыми ресурсами предъявленных объемов перевозок по техническим станциям по железным дорогам ВП

Результаты работы планировщика «ЛОКОМОТИВ»

Алгоритмы расчета очень сложные: Планировщику по локомотивам необходимо:

- смоделировать прогнозную работу всех технических станций по своевременному обеспечению поездов тягой в почасовых периодах в течение планируемых суток;
- подбора свободной нитки графика для отправления локомотивов резервом по регулировке;
- обеспечить остаток локомотивов в переходном резерве на следующие переходные сутки;
- соблюдение периодичности плановых видов ремонта и ТО2;
- обеспечить установленную технологию эксплуатации локомотивов на тяговом полигоне.

Планировщику по локомотивным бригадам еще сложнее, необходимо смоделировать прогнозную работу всех технических станций по своевременному обеспечению поездов, локомотивов контингентом ЛБ с учетом:

- соблюдения трудового законодательства;
- выполнения технологии работы ЛБ в установленном доле участия основного и оборотного депо;
- остатка резерва на следующие переходные сутки.

Алгоритм и результаты выходной таблицы имеют сложную форму.

Ниже представлена реализованная выходная форма результатов планирования модуля ПТК ИСУЖТ по работе объемных планировщиков по всем техническим станциям ВП (их более 70). (В закладке «ГОРИЗОНТ ПЛАНИРОВАНИЯ» зафиксирована работа объёмных и пообъектных планировщиков, в закладке «КАТЕГОРИЯ» их работа разграничена отдельно на

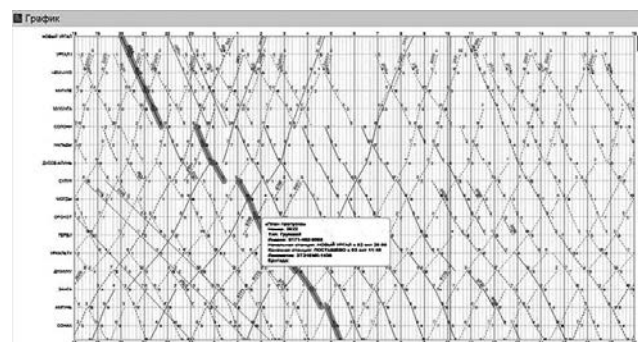
«ПОЕЗДА», «ЛОКОМОТИВ», «ЛБ»); Более 400 логических таблиц, которые имеют разную конфигурацию.

Суточное объемное планирование прибытия, отправления поездов по техническим станциям ВП

После:

- ритмичного, оптимального распределения грузовых поездов по ниткам графика;
- выбора ниток графика для выполнения регулировочных заданий по пересылке локомотивов резервом на станции дефицита локомотивов;
- обеспечения поездов локомотивами на всех станциях (с обеспечением переходного запаса на следующие сутки);
- обеспечением поездов и локомотивов необходимым контингентом ЛБ.

Разработанный СВДП (ПЛАН-ПРОПУСКА) с анализом в табличной форме (по часовым периодам) по каждой технической станции ВП должен поступать в ЦУТР руководителям диспетчерских смен, на станции ДСП на согласование.



План пропуска поездов

Если кем-то из руководителей ЦУТР, ДЦУП, станции предложенный вариант пропуска поездов не согласован, то конкретные замечания и предложения поступают обратно в модуль ПТК ИСУЖТ для доработки. И так будет повторяться, пока новый вариант не будет согласован.

жество факторов: отказы технических средств, поддержка окон, неисправность локомотивов, дефицит тяги, контингента ЛБ, ДЕФИЦИТ пропускных способностей станции и т.д.

ИСУЖТ. Текущее планирование прибытия и отправления поездов

Для решения этих конфликтных ситуаций, т.е. возврата поездов в расписание необходимо адаптировать

разработанный модуль ПТК ИСУЖТ Санкт-Петербург – Бусловская, Санкт-Петербург – Москва, позволяющий в реальном времени строить оптимальный ГДП и возвращать пассажирские и грузовые поезда в график.

Разработка и внедрение технологических принципов управления производственными процессами, взаимно увязанных между собой, при математическом моделировании в ПТК ИСУЖТ позволит:

1. Увеличить объемы перевозок в рамках существующей пропускной способности;
2. Обеспечить оптимальную ритмичность продвижения поездопотока;
3. Существенно улучшить показатели работы технических станций;
4. Сократить эксплуатационные затраты;
5. Оптимизировать контингент локомотивных бригад;
6. Усовершенствовать технологию управления тяговыми ресурсами;
7. Осуществлять пропуск поездов с соблюдением сроков доставки на любые расстояния;
8. Выполнять ремонтно-путевые работы с оптимальными сроками и максимальными объемами.

Бородин А.Ф., ОАО «НИИАС», г. Москва
Сайбаталов Р.Ф., ОАО «РЖД», г. Москва

Методы устранения эксплуатационных затруднений на основе оценки манёвренности и вариантных технологических режимов работы полигонов железнодорожной сети

Введение

Для повышения технологической эффективности использования железнодорожной инфраструктуры и подвижного состава в условиях накопления избыточного вагонного парка нужны новые научно-методические решения. Такие решения должны содержать комплекс методов устранения затруднений в эксплуатационной работе полигонов железнодорожной сети, которые принципиально делятся на две группы:

- 1) методы, основанные на регулировании загрузки полигонов сети железных дорог, испытывающих затруднения (регулирование погрузки по назначениям, размещения парков порожних вагонов, направления транзитных вагонопотоков, подвода поездов);
- 2) методы, основанные на интенсификации работы полигонов сети железных дорог, испытывающих затруднения (интенсификация выгрузки и развоза местного груза, вывоза поездов с сортировочных и грузовых станций, интенсификация маршрутных перевозок и др.).

Вторая группа методов, в отличие от первой, позволяет локализовать возникающие затруднения и предотвратить их распространение по сети, но в конкретных условиях методы этой группы могут оказаться более затратными либо технически нереализуемыми. Поэтому применение указанных методов должно иметь расчетное обоснование.

Уровень организации транспортных потоков

Сетевые регулировочные меры четырех классов (ограничение поступления вагонов рабочего парка на полигон; интенсификация сдачи («сброс») вагонов рабочего парка с полигона; вывод порожних вагонов из участия в перевозочном процессе – в отстой на станции с незагруженной путевой емкостью или в нерабочий парк; вывод вагонов на железнодорожные пути необщего пользования) сегодня необходимо классифицировать на меры, проводимые железными дорогами самостоятельно, и меры, которые осуществимы только при взаимодействии: 1) с отправителями и получателями грузов; 2) с отправителями и получателями порожних вагонов; 3) с владельцами железнодорожных путей необщего пользования.

По отношению к полигону, испытывающему экс-

плуатационные затруднения, регулировочные меры могут быть как внутренними, так и внешними. Так, интенсификация сдачи вагонов с полигона может быть организована без уменьшения их приема – за счет повышения транзитности поступающих вагонопотоков и более рациональных весовых норм.

Рассмотрим два взаимодействующих полигона железнодорожной сети А и В (которые в общем случае могут не быть смежными либо принадлежать разным железнодорожным инфраструктурам).

Повышая уровень организованности транспортного потока, следующего на полигон В, в пространстве (по назначениям, весу и длине поездов) и во времени (по темпам подвода), полигон А затрачивает инфраструктурные и временные ресурсы Z_A . Полигон В при этом получает экономию соответствующих ресурсов Z_B ; чем выше упорядоченность транспортного потока, тем меньше потребность в перерабатывающих мощностях и емкости путевого развития.

Но, кроме того, полигон А сам для себя снижает риск неприема потока полигоном В, то есть снижает вероятность ситуации, когда экономические потери полигона А составят величину

$$R \gg E(Z_A),$$

где $E(Z_A)$ – стоимостная оценка затрачиваемых ресурсов Z_A .

Имеет место Р-модель стохастического программирования с целевой функцией минимизации вероятности превышения величины R над $E(Z_A)$:

$$P(R > E(Z_A)) \rightarrow \min,$$

ограничениями на привлекаемые ресурсы

$$Z_A \leq Z_A^*$$

и на допустимые потери в финансовом результате

$$M[R(H_{\text{дост}}, H_{\text{обесп}}^{\text{погр}}, H_{\text{обесп}}^{\text{вмв}})] \leq R_{\text{max}}$$

где $H_{\text{дост}}$ – надежность выполнения сроков доставки грузов и порожних вагонов, не принадлежащих перевозчику (в том числе при перевозках с согласованным временем отправления и прибытия, устанавливаемым договором); $H_{\text{обесп}}^{\text{погр}}$ – надежность обеспечения при-

нятых заявок на перевозки грузов погрузочными ресурсами; $N^{ВВВ}_{обесп}$ – надежность обеспечения тяговыми ресурсами вывоза поездов с технических и грузовых станций.

Особенно важно учитывать это при организации взаимодействия железнодорожных инфраструктур разной принадлежности. Здесь нужно оценивать рассматриваемые риски, а не стремиться непременно получить с партнёра по перевозочному процессу оплату за дополнительные услуги по упорядочению потоков передаваемых транспортных единиц.

Манёвренность полигонов железнодорожной сети

Известно, что перенасыщение железных дорог вагонным парком снижает их манёвренность. Количественная оценка этого явления дана проф. Е.А Сотниковым [1], предложившим коэффициент манёвренности полигона железнодорожной сети, вычисляемый по соотношениям фактического рабочего парка грузовых вагонов и его граничных значений:

$$\alpha_{ман} = 100 (P_{max} - P_{факт} / (P_{max} - P_{техн})),$$

$$0 \leq \alpha_{ман} \leq 100\%,$$

где $P_{факт}$ – фактический рабочий парк грузовых вагонов, участвующих в перевозочном процессе, на путях железнодорожной инфраструктуры общего пользования; $P_{техн}$ – наибольший технически допустимый (рациональный) рабочий парк грузовых вагонов, участвующих в перевозочном процессе, на путях железнодорожной инфраструктуры общего пользования, при котором станции полигона обеспечивают беспрепятственный прием поездов; P_{max} – рабочий парк грузовых вагонов, участвующих в перевозочном процессе, на путях железнодорожной инфраструктуры общего пользования, при превышении которого все поезда на полигоне следуют с задержками на подходах к техническим и грузовым станциям.

Значение $\alpha_{ман}=0$, когда $P_{факт} \geq P_{max}$ и все поезда следуют по полигону с задержками по неприему станциями. $\alpha_{ман}=100\%$, когда $P_{факт} \leq P_{техн}$ и все поезда следуют по полигону беспрепятственно.

Таким образом, коэффициент манёвренности $\alpha_{ман}$ характеризует долю вагонопотока, которая при фактическом вагонном парке может следовать по полигону беспрепятственно – без задержек по неприему станциями, внешними стыковыми пунктами полигона, а также без задержек обмена вагонами с железнодорожными путями необщего пользования, выражающихся сверхнормативными остатками неподанных (неубранных) вагонов.

Теоретически, безусловно, правильной будет организация эксплуатационной работы, при которой $\alpha_{ман} = 100\%$. Однако в силу комплекса причин этот

идеал для отечественной железнодорожной сети недостижим уже десятки лет. Движенческая практика требует ответа на вопросы о том, как изменяются эксплуатационные показатели при снижении манёвренности железнодорожных полигонов, и какая степень потерь манёвренности является предельно допустимой.

Допустимое значение $\alpha_{ман}$ определяют четыре основных фактора: 1) $N^{пс}_{гдп}$ – надежность выполнения графика движения пассажирских поездов (в части опозданий пассажирских поездов из-за неудовлетворительной организации грузового движения); 2) $N_{дост}$; 3) $N^{погр}_{обесп}$; 4) $N^{ВВВ}_{обесп}$.

Необходимо для железнодорожного полигона вычислить функции $N^{пс}_{гдп} = f_1(\alpha_{ман})$, $N_{дост} = f_2(\alpha_{ман})$, $N^{погр}_{обесп} = f_3(\alpha_{ман})$, $N^{ВВВ}_{обесп} = f_4(\alpha_{ман})$, значения которых с повышением $\alpha_{ман}$ монотонно возрастают и стремятся к единице (см. рис. 1). Минимальное допустимое значение коэффициента манёвренности полигона

$$\alpha^*_{ман} = \max \{ \alpha^*_{ман(1)}; \alpha^*_{ман(2)}; \alpha^*_{ман(3)}; \alpha^*_{ман(4)} \},$$

где $\alpha^*_{ман(1)}$, $\alpha^*_{ман(2)}$, $\alpha^*_{ман(3)}$, $\alpha^*_{ман(4)}$ – значения $\alpha_{ман}$ при минимальных допустимых значениях соответствующих показателей надежности $N^{пс}_{гдп}$, $N_{дост}$, $N^{погр}_{обесп}$, $N^{ВВВ}_{обесп}$.

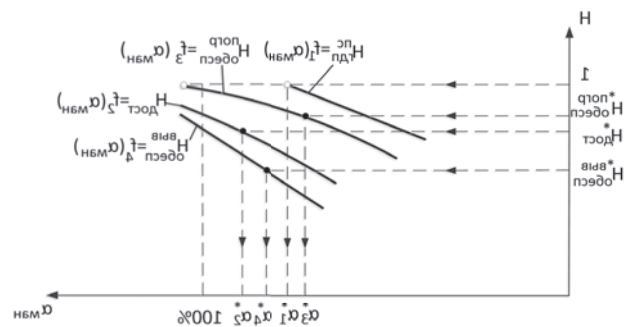


Рис.1

Допустимое значение $N^{пс}_{гдп}$ близко к единице. Потери манёвренности полигона не должны выходить за пределы, когда грузовые поезда и грузовые вагоны начнут занимать пути перегонов и станций в то время, когда графиком движения предусмотрено следование по этим путям пассажирских и пригородных поездов. Указанные пределы характеризуются значением $\alpha^*_{ман(1)}$.

Допустимые значения $N_{дост}$, $N^{погр}_{обесп}$, $N^{ВВВ}_{обесп}$ близки к единице в идеальных условиях эксплуатации, когда нет дефицита инфраструктурных и перевозочных ресурсов. В общем случае в затрудненных условиях работы указанные значения надежности меньше единицы. Их отыскание – технико-экономическая задача. Её нужно решать совместно для всех трёх компонентов надежности грузового движения, так как для их обеспечения используются общие ресурсы.

Таким образом, среди возможных значений $N_{дост} \leq 1$, $N^{погр}_{обесп} \leq 1$, $N^{ВВВ}_{обесп} \leq 1$ необходимо отыскать мно-

жество значений $\{N_{\text{дост}}^*; N_{\text{обесп}}^{\text{погр}}; N_{\text{обесп}}^{\text{выб}}\}$, обеспечивающее минимум математического ожидания суммарных потерь в финансовом результате

$$F = M [R (N_{\text{дост}}^*, N_{\text{обесп}}^{\text{погр}}, N_{\text{обесп}}^{\text{выб}})] \rightarrow \min$$

при соблюдении ограничений на доступные ресурсы

$$Z \leq Z^*.$$

Z является вектор-функцией от $\alpha_{\text{ман}}$, характеризующей инфраструктурные ресурсы (перерабатывающие способности сортировочных комплексов и грузовых терминалов, накопительные и регулирующие емкости путевого развития, пропускные способности станций, участков и внутриузловых ходов) и перевозочные ресурсы (парки подвижного состава, контингент локомотивных бригад).

Потери в финансовом результате R учитывают дополнительные расходы, связанные с обеспечением надежности в условиях существующих ограничений, и потери доходов, связанные как с рисками штрафных выплат за ненадлежащее исполнение обязательств по перевозочному процессу, так и с рисками снижения доходных поступлений из-за отказа части грузоотправителей от услуг железнодорожного транспорта.

Последнее обстоятельство требует дифференцированного подхода к организации работы в разных сегментах рынка транспортных услуг.

Расчет показателей работы вагонных парков

В ОАО «НИИАС» с участием специалистов ОАО «ВНИИЖТ», ОАО «ИЭРТ» и научно-производственного холдинга «Стратег» выполнено исследование маневренности полигонов железнодорожной сети и разработаны нормативы рационального соотношения вагонных парков и вместимости путей сортировочных, участковых и грузовых станций с учетом увеличения доли частных вагонов [2].

Исходя из результатов данного исследования, в ОАО «РЖД» разработана и утверждена Методика расчета показателей работы вагонных парков, позволяющих осуществлять мониторинг, анализ и оценку влияния избыточности парков на эффективность и результативность работы сети.

В рамках указанной Методики эффективность работы сети ОАО «РЖД» выражается в оценке влияния избыточности вагонных парков на показатели использования перевозочных ресурсов – скорости движения поездов, производительность локомотива, оборот грузового вагона, а результативность работы сети – в оценке влияния избыточности вагонных парков на объем выполняемых перевозок через возможности инфраструктуры в пунктах погрузки, выгрузки и в пути следования.

В методике предусмотрено определение величины рабочего парка грузовых вагонов по двум критериям:

технологически необходимого (потребного) для выполнения заданных объемов перевозок;

технически допустимого (рационального) по условиям сохранения маневренности подразделений железнодорожной сети.

При этом величина рабочего парка рассматривается отдельно на инфраструктуре общего и необщего пользования.

Технологически необходимый (потребный) рабочий парк грузовых вагонов, участвующих в перевозочном процессе, $P_{\text{раб.потр}}$ (в том числе на путях общего пользования инфраструктуры ОАО «РЖД» $P_{\text{раб.потр.оп}}$ и на железнодорожных путях необщего пользования $P_{\text{раб.потр.ноп}}$) определяется по родам вагонов и подразделениям сети, исходя из прогнозируемой перевозочной работы в месяце максимальных грузовых перевозок, а также прогнозируемых изменений грузевого рейса вагона, коэффициента порожнего пробега и коэффициента транзитности вагонопотоков по техническим станциям (в части, зависящей от системы управления вагонными парками), (в частности, в зависимости от системы управления вагонными парками), коэффициента двоярных грузовых операций.

Технически допустимый (рациональный) рабочий парк грузовых вагонов, участвующих в перевозочном процессе, при котором станции полигона обеспечивают беспрепятственный прием поездов и беспрепятственный обмен вагонов с железнодорожными путями необщего пользования,

$$P_{\text{техн}} = P_{\text{техн.оп}} + P_{\text{техн.ноп}} = P_{\text{техн.ст}} + P_{\text{техн.уч}} + P_{\text{техн.ноп}}$$

где $P_{\text{техн.оп}}$, $P_{\text{техн.ноп}}$ – наибольший технически допустимый (рациональный) рабочий парк грузовых вагонов, участвующих в перевозочном процессе, находящихся соответственно на путях общего пользования инфраструктуры ОАО «РЖД» (в том числе на станциях $P_{\text{техн.ст}}$ и в поездах на участках $P_{\text{техн.уч}}$) и на железнодорожных путях необщего пользования.

Для железнодорожного полигона

$$P_{\text{техн}} = \Sigma P_{\text{техн.ст}} + \Sigma P_{\text{техн.уч}};$$

$$\Sigma P_{\text{техн.уч}} = \Sigma nt_{\text{гдп}} m_{\text{ун}} / 24,$$

где $\Sigma nt_{\text{гдп}}$ – сумма поездо-часов на участках полигона по нормативному графику движения поездов; $m_{\text{ун}}$ – унифицированная длина состава поезда, условных вагонов.

Рациональное соотношение вместимости путевого развития и рабочего парка вагонов для железнодорожной станции (пути необщего пользования):

$$\varphi_{\text{рац.ст(ноп)}} = (E_{\text{в.ст(ноп)}} - \Sigma E_{\text{отст}}) / (P_{\text{техн.ст(ноп)}} \omega)$$

где $E_{\text{в.ст(ноп)}}$ – вместимость путей станции (пути необщего пользования), предназначенных для нахождения на них грузовых вагонов, условных вагонов;

$\Sigma E_{\text{отст}}$ – в том числе путей для отстоя грузовых вагонов, не участвующих в перевозочном процессе, условных вагонов; ω – отношение средневзвешенной длины физического вагона на рассчитываемом полигоне (по существующей структуре вагонного парка) к длине условного вагона, $\omega = l_{\text{ср. физ}} / l_{\text{усл}}$.

Для железнодорожного полигона по станциям без учета участков и путей необщего пользования:

$$\phi_{\text{рац.рег}} = 1,05 k_{\text{рег}} (\Sigma E_{\text{в.ст}} - \Sigma E_{\text{отст}}) / [\Sigma P_{\text{техн.ст}} \omega],$$

где 1,05 – коэффициент, учитывающий неравномерность размещения вагонных парков между станциями региона [1]; $k_{\text{рег}}$ – коэффициент, учитывающий необходимость регулирующей емкости путевого развития в регионах железных дорог: обслуживающих морские и речные порты либо подходы к ним; расположенных на основных загруженных направлениях сети ОАО «РЖД» обслуживающих перегрузочные пограничные переходы и крупные железнодорожные пути необщего пользования [3].

Вариантные технологические режимы

Меры по локализации и преодолению потерь маневренности железнодорожных полигонов должны базироваться на систематизации причин возникновения эксплуатационных затруднений, из которых только часть носит стихийный непрогнозируемый характер. Значительная часть возможных затруднений может быть смоделирована заблаговременно – в связи с плановыми работами по ремонту и реконструкции инфраструктуры, сезонными пиками перевозок пассажиров или определённых грузов и др.

Сегодня в ходе планирования ремонтных работ и перевозочного процесса от причастных руководителей и специалистов требуется совершение неформализованных действий и экспертно принимаемых решений, вызываемых:

1) выявляемой несбалансированностью предъявляемых вагонопотоков и доступной мощностью инфраструктуры в периоды производства ремонтных и строительно-монтажных работ; 2) необходимостью определения приоритетности работ по ремонту и реконструкции инфраструктуры внутри годового периода, в том числе при использовании метода сплошного закрытия главных путей на перегонах; 3) необходи-

мостью учета вариантов пропуска и отклонения поездопотоков, принимаемых на период работ по ремонту и реконструкции инфраструктуры, в бюджетных показателях дирекций производственного блока ОАО «РЖД».

Организация движения в периоды производства ремонтных и строительно-монтажных работ должна предусматривать не только варианты графики движения (основанные на форсированном использовании мощности ограничивающих элементов и увязке окон в створах сетевых направлений), но и наличие в нормативных графиках движения числа ниток, достаточных для пропуска поездов, отклоняемых с ремонтируемых направлений. Отклонение поездов с минимальными эксплуатационными потерями должно предусматриваться планом их формирования, с одновременной проверкой достаточности (а при необходимости – перераспределением) тяговых ресурсов.

Внедряемый в ОАО «РЖД» комплексный подход к ремонту и текущему содержанию инфраструктуры (определение сетевых полигонов единой технологии производства работ, рациональная длительность и периодичность закрытия перегонов и путей, рациональная цикличность и совмещение видов работ на пассажиро- и грузонапряженных направлениях) должен предусматривать меры по обеспечению маневренности полигонов и направлений железнодорожной сети.

Таким образом, взаимоувязанное планирование перевозочного процесса, ремонтных работ и бюджетных показателей требует полноценного перехода от вариантных графиков движения поездов на участках и направлениях к вариантным технологическим режимам работы полигонов железнодорожной сети.

Литература

1. Сотников Е.А. Эксплуатационная работа железных дорог (состояние, проблемы, перспективы). – М.: Транспорт, 1986. – 256 с.
2. Бородин А.Ф., Сотников Е.А. Рациональное соотношение вместимости путей станций и вагонных парков с учетом увеличения доли частных вагонов. – Железнодорожный транспорт, 2011. – № 3. – С. 8 – 19.
3. Бородин А.Ф. Эффективно использовать станционные мощности. – Железнодорожный транспорт, 2006. – № 6. – С. 37 – 43.

Захарова Е.М., Минашина И.К., МФТИ, г. Москва

Разработка и анализ алгоритмов оптимизации в задачах планирования на железнодорожном транспорте

1. Вступление

В последние годы большое внимание уделяется созданию и развитию систем поддержки принятия решений (СППР) в интеллектуальных транспортных системах. Одной из проблем, решаемых подобными системами, является построение оптимальных расписаний движения. Данная задача является достаточно трудоемкой, сложность которой зависит как от параметров и ограничений системы, так и от их количества. При этом сложнее всего найти именно оптимальное расписание при гарантии того, что не может быть найдено расписания, подходящего лучше найденного при учете поставленных условий.

Поиск наилучшего расписания можно аппроксимировать задачей поиска глобального экстремума. Для реальных задач выбора наиболее предпочтительного решения как экстремума целевой функции существует множество алгоритмов поиска искомой величины. Задача поиска оптимального решения в области управления железнодорожными перевозками характерна сложностью переменных фазового пространства и ограничений в нем, определяемых особенностью путевой инфраструктуры и технологическим процессом перевозки. Хорошо известные поисковые алгоритмы не всегда являются оптимальными применительно к сложным системам управления с большим количеством ограничений, поэтому возникает задача построения новых, более совершенных алгоритмов оптимизации.

В данной работе исследуется поиск наилучшего расписания движения и обеспечения поездов локомотивами как задача поиска глобального экстремума целевой функции. Основное внимание уделяется построению математической модели управления перевозочным процессом на основе технологии мультиагентных систем (МАС) и ее последующей оптимизации с использованием стохастического и генетического алгоритмов (ГА).

2. Постановка задачи

Задачу можно сформулировать следующим образом: имеются исходные данные - состояние и дислокация локомотивов на начало планируемого периода, их параметры; маршруты поездов с подобранными под них нитками вариантного графика. Необходимо сфор-

мировать схему прикрепления локомотивов к поездам на планируемый период, обеспечивающую наилучшее выполнение плана перевозок с соблюдением заданных ограничений и технологических нормативов работы локомотивов.

Данная задача может иметь множество решений разной степени оптимальности. Для качественной оценки какого-либо варианта назначения введем целевую функцию пары «*i*-й план отправления поезда (либо план пересылки локомотива резервом) – назначенный на него локомотив x_i » $u_i(x_i)$. План отправления поезда содержит в себе информацию о станциях и точном времени отправления и прибытия поезда, а также номер поезда. План пересылки локомотива резервом содержит информацию о резервной пересылке.

Целевая функция пары «план - локомотив» имеет следующий вид:

$$u_i(x_i) = C_1 \frac{T_s(x_i)}{N_1} + C_2 \frac{T}{N_2} + C_3 \frac{T_w(x_i)}{N_3} \quad (2.1)$$

Параметры функции оценки:

$C_1, C_2, C_3, N_1, N_2, N_3$ – настраиваемые и нормировочные коэффициенты.

$T_s = \text{TimeToService} - T - \text{TimeReturn}$ $T_s(x_i)$ – время, оставшееся до следующего ремонта с учетом времени движения локомотива на данном участке и времени возврата на ближайшую от точки прибытия станцию с необходимым типом ремонта.

$T = \text{TimeArr} - \text{TimeDep}$ T – время движения локомотива на данном участке.

$T_w = \text{TimeDepNext} - \text{TimeArr}$ $T_w(x_i)$ – время ожидания локомотивом отправления поезда.

Рассматривая оптимизацию прикрепления локомотивов к поездам в целом на всем участке планирования, будем использовать суммарную целевую функцию

$F(X) = \sum_i u_i(x_i)$, которая равна сумме целевых функ-

ций, составляющих график планов пересылки. Рассмотрим суммарную целевую функцию как многомерную функцию векторного аргумента $X = [x_1, x_2, \dots, x_m]T$, где вектор X – какое-либо решение задачи назначения локомотивов на планы пересылки, представленное в виде

$$\begin{pmatrix} loco_1 \\ \dots \\ loco_i \\ \dots \\ loco_m \end{pmatrix} (loco_1, \dots, loco_i, \dots, loco_m)^T,$$

где $loco_i$ – номер локомотива, назначенного на i -й план, m – количество планов пересылки поездов и резервных локомотивов на всем участке планирования. Тогда для решения задачи оптимизации планирования необходимо решить общую задачу поиска экстремума вышеупомянутой функции с заданными ограничениями:

$$\begin{aligned} F(X) &= \sum_i u_i(x_i) \rightarrow \text{extr}(\max); \\ X^* &= \arg \text{extr} F; g_j(X^*) \leq b_j, j = 1, \dots, k, \end{aligned} \quad (2.2)$$

где X^* – искомое решение; $g_j(X) \leq b_j$ – заданные ограничения, k – их количество.

В общем случае алгоритм поиска экстремума выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} x_{n+1} &= |A| * x_n \quad x_{n+1} = |A| * x_n \quad x_{n+1} = |A| * x_n \\ X^{n+1} &= ||A|| X^n, ||A|| < 1, \end{aligned} \quad (2.3)$$

где A — итерационный оператор. Поиск производится на множестве ограничений, связанных с технологическими особенностями в железнодорожном комплексе. Тогда необходимо найти такой вид итерационного оператора A , чтобы описанный выше итерационный процесс сходил к наилучшему решению или к экстремуму функции $F(X)$.

3. Общая структура модели

Общая структура модели представлена на рисунке Рис.1.



Рис. 1. Общая структура модели

Данная работа состоит из двух этапов. Первым этапом является построение математической модели управления перевозочным процессом и разработка системы управления железнодорожными перевозками на основе мультиагентных технологий. Для решения поставленной задачи оптимизации назначения локомотивов на поезда применяется так называемый «жадный» алгоритм, т.е. на каждом шаге принималось локально оптимальное решение на основе локальной целевой функции пары «локомотив-план», просчитывая «полезность» влияния избранного решения лишь

на ограниченное количество шагов вперед. Как известно, этот алгоритм является гораздо более простым в реализации, чем другие алгоритмы оптимизации. Однако моделирование поставленной задачи таким методом часто приводит к неоптимальному решению на всем участке планирования. В связи с этим требовалось построить алгоритм глобальной оптимизации, адаптированный к данному типу задачи.

Данная задача оптимизации может быть решена при помощи двух совершенно разных подходов: методами математического программирования и ГА. Каждый из них имеет свои преимущества и недостатки, учитывая которые, указанные подходы можно оптимально использовать при планировании в различных случаях. Методы математического программирования дают широкий выбор алгоритмов оптимизации различной скорости сходимости. В данной статье предложено использовать гибридный алгоритм, разработанный на основе модифицированных покоординатного метода и метода стохастической оптимизации. ГА позволяет найти решение к аналитически сложным задачам с использованием механизмов, основанных на биологической эволюции.

Таким образом, первый этап моделирования дает локально неоптимальное решение поставленной задачи, которое впоследствии используется как первоначальная точка для поисковых алгоритмов глобальной оптимизации.

4. Мультиагентная система управления перевозочным процессом

Наиболее эффективный анализ и прогнозирование динамических характеристик в задачах исследования реализуемости потока запросов при ограниченных ресурсах обеспечивают средства, основанные на теории МАС. МАС с учетом предоставляемых ими преимуществ – автономности, децентрализованности, индивидуального поведения с возможностью обучения и адаптации для составляющих их агентов - автоматизируют полный цикл работы в динамических системах управления ресурсами. Основными объектами системы являются: локомотивы и станции с набором параметров и стратегий; объект планировщика, выполняющий роль центрального синхронизирующего элемента, формирующего конечное расписание.

5. Алгоритм решения

Система получает на вход список станций и локомотивов с их параметрами, набор объемных планов пересылки локомотивов, а также сформированные ранее детальные маршруты поездов с подобранными под них нитками вариантного графика. Для каждого объемного плана пересылки планировщик уточняет

времена отправления и прибытия локомотива на станции, исходя из детального маршрута соответствующего поезда. Затем происходит пообъектное назначение локомотивов, наилучшим образом подходящих под тот или иной план пересылки. Опишем алгоритм объектного назначения локомотивов:

1. Для каждого времени, в которое по плану должен отправиться хотя бы один локомотив, составляется список станций отправления
2. В свою очередь для каждой станции:
 - 2.1. рассчитывается функция оценки всех существующих в указанное время на этой станции комбинаций “план- локомотив”;
 - 2.2. производится назначение на планы пересылки, существующие на этой станции в данное время конкретных локомотивов в соответствии с рассчитанной локальной целевой функцией;
 - 2.3. выбранные локомотивы назначаются на планы, их местонахождение и параметры обновляются в соответствии с планом пересылки для дальнейшей работы;
 - 2.4. переход на шаг №2 для следующей станции, либо переход к следующему по времени на шаг №1.
3. После выполнения алгоритмом шагов №1 и №2 для всех найденных времен отправления, планировщик формирует выходное сообщение системы в виде детальных маршрутов движения локомотивов с указанием поезда, к которому прикреплен локомотив, а также статуса локомотива.

Рассмотрим подробнее некоторые шаги алгоритма.

На шаге 2.1 агентами локомотивов, находящимися на данной станции в указанное время, рассчитывается локальная целевая функция (2.1) их возможного назначения на существующие в это время на станции планы пересылки. В случаях, если $T_s(x_i) < 0$ либо локомотив не соответствует заданным технологическим ограничениям, то он не может быть назначен для данного плана и комбинация «локомотив-план» выпадает из рассмотрения планировщика, а локальной целевой функции $u_i(x)$ присваивается заранее установленное минимальное значение U_{min} .

Чтобы избежать случаев, когда рассчитываемое на текущем шаге назначение приведет к тупиковой ситуации в дальнейшем, на данном этапе моделирования применяется ограниченный просчет влияния рассматриваемого назначения на будущие планы пересылки. Для этого при подсчете целевой функции кроме значения самой локальной функции $u_i(x)$ агенты локомотивов рассчитывают также следующие целевые функции:

$$U_i^q(x) = \sum_j u_j(x), \forall j \in D^q, q = 1, 2, \dots, Q(i, d), \quad (5.1)$$

где q – номер ветви в дереве планов, на которые локомотив x может быть последовательно назначен в случае его передислокации в соответствии с планом i ; d – заданная глубина, на которую строится дерево планов, зависящих от плана i ; $Q(i, d)$ – количество ветвей дерева для плана i с глубиной проникновения d ; D^q – множество планов пересылки ветви q .

После расчета функций $U_i^q(x)$ среди них выбирается одна с максимальным значением $U_i^{q_{max}}(x)^{MAX}$ и посылается агенту планировщика. Именно она учитывается при назначении локомотивов на планы пересылки на шаге 2.2.

Необходимо заметить, что выбор большой глубины проникновения d представляется невозможным из-за неприемлемо долгой работы системы. Поэтому на данном этапе моделирования приходится использовать небольшую глубину расчета и, соответственно, локально оптимизирующий «жадный» алгоритм для привязки локомотивов на последующем шаге.

На шаге 2.2 производится назначение конкретных локомотивов на планы пересылки, существующие на этой станции в указанное время, в соответствии с локальной целевой функцией, рассчитанной на предыдущем шаге. Планировщик выбирает для каждого плана из всех возможных на текущем шаге вариантов назначения локально оптимальный вариант с максимальной целевой функцией $u_i(x_j)$. При этом порядок обработки планов пересылки на станции зависит от продолжительности маршрута: планы, имеющие более длинный маршрут, обрабатываются в первую очередь.

Таким образом, была разработана система моделирования с использованием мультиагентного подхода, которая показала на практике способность успешно обходить множество технологических ограничений и выдавать достаточно адекватное, но локально оптимальное решение поставленной задачи.

6. Разработка поискового алгоритма оптимизации

Полученный с помощью МАС управления перевозочным процессом результат не всегда отражает оптимальное в целом решение задачи назначения локомотивов на поезда. Поэтому возникает необходимость в разработке алгоритма оптимизации, используя полученный результат как начальную точку для поиска глобального экстремума.

6.1. Гибридный алгоритм оптимизации

При более детальном изучении поставленной задачи и ее ограничений легко увидеть, что выявление области определения суммарной целевой функции $F(X)$ является далеко не тривиальной задачей. Происходит это из-за сильной зависимости компонент вектора X

друг от друга. Принимая к сведению неудобства, связанные с вычислением точного вида ограничений $q_i(x_1, x_2, \dots, x_m) \leq b_i$ для поставленной задачи оптимизации, традиционные методы локальной и глобальной оптимизации, как и выбранный в данной работе метод стохастической аппроксимации, представляются не применимыми к данной задаче в своем первоначальном виде. Поэтому предлагается использовать гибрид координатного метода и метода стохастической аппроксимации.

Рассмотрим процедуру оптимизации на основе метода Кифера-Вольфовица:

$$x_i^n = x_i^{n-1} + \alpha_n \frac{F(X^+) - F(X^-)}{2c_n}, \quad (6.1.1)$$

где α_n, c_n – параметры; $F(X^+)$ – суммарная целевая функция, взятая в некоей точке $X^+ = (x_1, \dots, x_i^{n-1} + c_n, \dots, x_m)^T$ – точке со значением $x_i^{n-1} + c_n$ в «фиксированной» i -ой координате и просчитанными относительно нее зависимостями по другим «свободным» координатам; $F(X^-)$ – значение целевой функции в соответствующей точке:

$$X^- = (x_1, \dots, x_i^{n-1} - c_n, \dots, x_m)^T.$$

После расчета по описанной процедуре нового значения «фиксированной» координаты x_i^n происходит построение в соответствии с ним нового значения вектора X^n из области допустимых решений. Расчет зависимостей и построение относительно нового значения «фиксированной» координаты точки допустимого решения производится с помощью описанной в предыдущем разделе MAC управления перевозочным процессом.

Было доказано, что предложенный алгоритм оптимизации сходится к точке максимума оптимизируемой функции, если выполнены условия на соответствующие последовательности коэффициентов α_n, c_n :

$$\begin{aligned} \alpha_n > 0, \alpha_n \rightarrow 0, \sum \alpha_n = \infty, \\ c_n > 0, \sum \alpha_n c_n < \infty, \sum \alpha_n^2 / c_n^2 < \infty, c_n \rightarrow 0 \end{aligned} \quad (6.1.2)$$

В данной работе в соответствии с найденными условиями (6.1.2) были использованы следующие последовательности коэффициентов для оптимизирующей процедуры:

$$C_n = b_1 / \sqrt[4]{n}; a_n = b_2 / n, \quad (6.1.3)$$

где b_1 и b_2 – параметры, настраиваемые эвристическим путем в зависимости от свойств реального процесса.

Таким образом, был построен специальный гибридный алгоритм, учитывающий технологические особенности в железнодорожном комплексе и позволяющий находить глобальный максимум целевой функции $F(X)$ на множестве ограничений с неопределенной структурой.

6.2. Реализация генетического алгоритма

В данной работе исследуется модификация ГА в применении к задаче оптимизации многоэкстремальной функции. Для ГА необходимо дополнительно задать следующие параметры: размер популяции P количество популяций M ; количество наилучших особей D . Все параметры для станций и локомотивов записываются с исходным идентификатором $PId = 0$.

Для создания одной особи родительской популяции используется основной механизм привязки локомотивов на поезда, описанный выше. Для каждой особи на основе найденных решений план-локомотив создается матрица назначений – ее генотип:

$$M_{\text{Population_id}} = \begin{pmatrix} m_1(\text{PlanId}_1, \text{LocoId}_1, PId, A_1) \\ \dots \\ m_i(\text{PlanId}_i, \text{LocoId}_i, PId, A_i) \end{pmatrix}, \text{ где:}$$

PlanId – уникальный номер плана пересылки локомотива; LocoId – уникальный номер локомотива, назначенного на план PlanId (в случае если не найден ни один подходящий локомотив, $\text{LocoId} = -100$); PId – порядковый номер популяции; A – флаг ($A = 1$, если локомотив назначен, 0 – если нет).

Для каждой особи рассчитывается суммарная функция полезности, равная сумме полезностей всех пар план-локомотив. Данное значение хранится как значение функции приспособленности особи и используется в качестве количественной характеристики при селекции.

Кроссовер используется для генерации последующих поколений. Для создания дочерней особи из популяции отбираются два родителя – P_1 и P_2 , процесс селекции которых описывается уравнением:

$$m_i^{\text{child_1}} = \begin{cases} m_i^{P_1}, & \text{если } A_{P_1} = 1 \\ m_i^{P_2}, & \text{если } A_{P_2} = 1 \text{ и } \text{LocoId}_{\text{PlanId}}^{P_1} \neq -100 \\ m_i^{P_1}, & \text{если } A_{P_2} = 0 \text{ и } A_{P_1} = 0 \end{cases}$$

Полезность каждой сгенерированной дочерней особи задается системой:

$$U_{\text{child}_i}(\text{LocoId}, \text{PlanId}) = \begin{cases} U_{P_1}(\text{LocoId}, \text{PlanId}), & \text{если } m_i^{\text{child_1}} = m_i^{P_1} \text{ и } A_{P_1} = 1 \\ U_{P_2}(\text{LocoId}, \text{PlanId}), & \text{если } m_i^{\text{child_1}} = m_i^{P_2} \text{ и } A_{P_2} = 1 \\ 0, & \text{если } A_{P_1} = 0 \text{ и } A_{P_2} = 0 \end{cases}$$

С некоторой вероятностью в популяции может произойти мутация. Для этого в генотипе особи-мутанта случайным образом определяется ген – PlanId и его параметр $\text{CurrentTime}_{\text{PlanID}}$. Все агенты локомотивов и станций откатывают все изменения до этого времени, затем планировщик снова назначает локомотивы на поезда, используя исходный алгоритм.

В конце генерации каждой популяции отбирается заданное число наилучших особей для удаления их из потомства. Генерация новых популяций прекращается или при достижении конечного размера популяции

или при улучшении функции полезности новой особи, не превышающей заданной точности ΔF . Лучшая особь с максимальной функцией полезности выбирается из списка всех сгенерированных особей. Если таких особей несколько, то выбирается та, что имеет наибольшее количество пар (N_{assign}).

7. Результаты

Созданная система моделирования железнодорожных грузоперевозок была протестирована на имитационных данных Восточного полигона.

7.1. Результаты работы гибридного алгоритма оптимизации

На вход построенной системы управления грузоперевозками были поданы следующие данные: 199 поездов, 220 станции, 462 перегона, 67 тяговых плеч, 240 объемных планов пересылки, 163 реальных плана пересылки локомотивов с поездом или резервом, 262 локомотива, данные об их расположении и параметрах, нормативные времена технических стоянок, весовые типы поездов.

Рассмотрим результаты работы предложенного гибридного алгоритма оптимизации. Для анализа его работы при различных вариациях последовательностей коэффициентов процедуры оптимизации a_n и c_n (6.1.3), удовлетворяющих найденным условиям сходимости (6.1.2), были проведены серии экспериментов с изменением параметров b_1 и b_2 указанных последовательностей (6.1.3). Ниже изображен процесс сходимости процедуры оптимизации при различных значениях параметров b_1 и b_2 (Рис. 2).

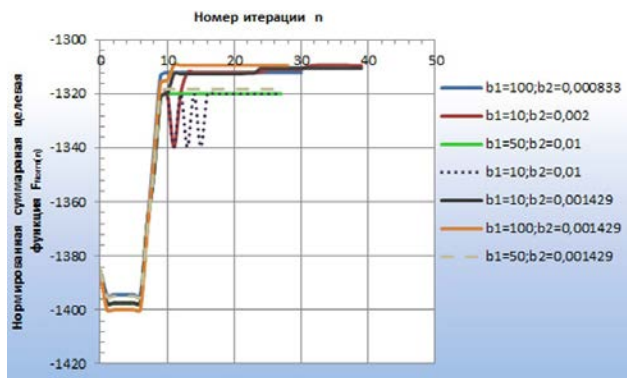


Рис. 2. Процесс сходимости процедуры оптимизации при различных значениях параметров b_1 и b_2

На рис.2 представлена график нормированной суммарной целевой функции F_{Norm}^n в зависимости от номера итерации n:

$$F_{Norm}^n = \frac{F(X^n)}{N_F \cdot m}, \tag{7.1.1}$$

где N_F – нормировочный коэффициент суммарной целевой функции.

Как видно из графика, при относительно больших b_2 , к примеру, $b_2=0,01$, процедура оптимизации сходится к локальному максимуму, однако, при уменьшении параметра b_2 происходит постепенный уход процедуры оптимизации от локального максимума и переход в сторону сходимости около глобального экстремума. Что касается параметра b_1 , логично предположить, что скорость сходимости процедуры оптимизации увеличивается с увеличением указанного параметра.

Было проведено исследование зависимостей количества итераций N^* , при котором достигается сходимость процедуры оптимизации в глобальном экстремуме, от значений параметров b_1 и b_2 , по результатам которого была найдена оптимальная пара параметров для последовательностей коэффициентов (6.1.3): $b_1=100$, $b_2=0,000909091$. С найденными значениями параметров процедура оптимизации выдала окончательное решение задачи назначения локомотивов на заданные планы пересылки, улучшенное на 7% от первоначального, что для реальных данных подобного масштаба является достаточно хорошим результатом.

Для оценки эффективности работы построенной системы грузоперевозок были рассчитаны качественные показатели использования эксплуатируемых локомотивов, представленные в табл. 1.

Таблица 1.

Качественные показатели работы МАС управления перевозочным процессом и процедуры ее дальнейшей оптимизации.

Этапы моделирования	МАС управления железнодорожными перевозками	Гибридный алгоритм оптимизации
Качественные показатели		
Среднесуточная производительность, W_L , ткм брутто	45642.8	98354.8
Среднесуточный пробег, S_L , км	453.91	517.88
Участковый оборот, Θ_L , ч. (за планируемый период в б часов)	4.67	5.27
Коэффициент эффективности использования эксплуатируемого парка локомотивов, K	0.68	0.83

Проанализировав представленные качественные показатели, можно прийти к заключению, что разработанная МАС управления железнодорожными перевозками предоставляет адекватное решение задачи планирования прикрепления локомотивов к поездам, а построенный гибридный алгоритм оптимизации позволяет повысить эффективность использования эксплуатируемого локомотивного парка.

Таблица 2.

Эффективность ГА

Параметр	Решение «жадного» алгоритма	P=15, M=10, D=4(по F)	P=20, M=10, D=4(по F)	P=20, M=10, D=4 (N _{assign})	P=15, M=20, D=4 (N _{assign})	P=15, M=20, D=4(по F)
$F(X)$	139440	335760	210480	-109920	-109920	414960
N_{assign}	27	14	16	47	47	13
Время работы	1 м, 13 с	15 м, 24 с	22 м, 56 с	19 м, 13 с	9 м, 29 с	10 м, 31 с

7.2. Результаты моделирования генетического алгоритма

Для моделирования ГА были заданы следующие параметры: 566 станций, 772 объемных плана локомотива, 469 поездных плана, 4723 нитки маршрутов поездов, 783 реальных локомотива с их параметрами, 44 реальных поезда.

Из результатов моделирования видно, что в зависимости от выбранного параметра оптимизации, ГА показывает лучшие результаты выполнения плана привязки локомотивов к поездам, чем исходный «жадный» алгоритм.

8. Выводы

В результате исследования была создана система моделирования грузоперевозок на Восточном полигоне с использованием мультиагентного подхода. Построенная МАС показала на практике способность успешно обходить множество технологических ограничений и выдавать достаточно адекватное решение поставленной задачи, удовлетворяющее всем условиям моделируемой системы. Для оптимизации полученного результата было предложено два различных алгоритма поисковой оптимизации задачи привязки конкретных локомотивов к планам пересылки, ис-

пользующих полученное с помощью МАС решение в качестве начальной точки. В качестве первого подхода был разработан специальный гибридный алгоритм, улучшающий качественные показатели системы и показывающий хорошее быстродействие и скорость сходимости. Использование ГА позволило улучшить первоначальное решение, оптимизируя как значение целевой функции, так и количество назначений локомотивов на поезда. Данная работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ, грант №14.582.21.003.

Литература.

1. Пащенко Ф.Ф. «Введение в состоятельные методы моделирования систем; Ч. 2. Идентификация нелинейных систем», М.: Финансы и статистика, 2007.
2. Jeffrey W., Rosner R. Optimization algorithms: simulated annealing and neural network processing – Astrophysical Journal, Part 1, 1986, V.310, p.473-481
3. Барабашова О.В., Крушель Е.Г. Алгоритмы поиска экстремума функции многих переменных, ВолгГТУ, Волгоград, 2000 – 30 с.
4. Holland John H. Adaptation in Natural and Artificial Systems - MIT Press Cambridge, MA, USA – 1992.

Ерофеев А. А., *Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*
Старинская Н. А., *Государственное объединение Белорусская железная дорога, г. Минск*
Прудников П. Н., *СП ЗАО «Международный Деловой Альянс», г. Минск*

Интеллектуальные технологии в оперативном планировании грузовой работы Белорусской железной дороги

На Белорусской железной дороге продолжают работу по созданию Комплексной системы управления поездной работой (КС УПР БЧ), в рамках которой предприняты попытки реализации интеллектуальных технологий управления перевозочным процессом.

Очередным этапом стало создание Автоматизированной системы сменно-суточного планирования грузовой работы (АС ССП). Данная система разработана специалистами СП ЗАО «Международный Деловой Альянс» (г. Минск) при научном сопровождении сотрудников кафедры «Управление эксплуатационной работой» Белорусского государственного университета транспорта (БелГУТ). Заказчиком системы выступила служба перевозок Белорусской железной дороги. Начиная с августа 2014 года АС ССП находится в промышленной эксплуатации на всем полигоне Белорусской железной дороги. Интерфейс АС ССП приведен на рис. 1.

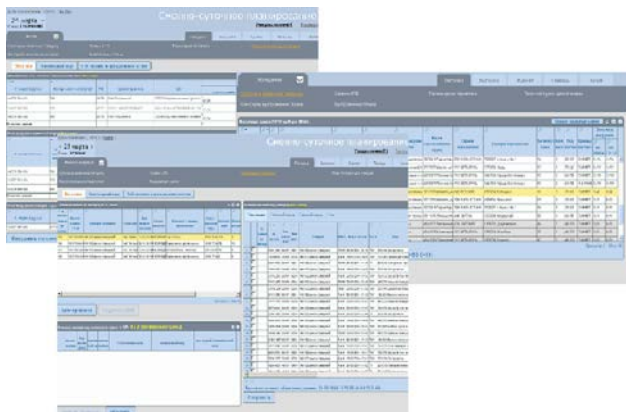


Рис. 1. Интерфейс АС ССП

Актуальность создания АС ССП предопределена увеличением уровня информатизации управления эксплуатационной работой на Белорусской железной дороге. Повышение детализации вагонной модели, усложнение структуры вагонного парка дороги, вызванное увеличением количества операторов подвижного состава вызывает значительное увеличение ограничений при использовании вагонов. При этом традиционная система сменно-суточного планирования погрузки-выгрузки была ориентирована на принятие экспертных решений разработчиками на всех уровнях управления, что в современных условиях затрудни-

тельно. Указанные особенности системы сменно-суточного планирования погрузки-выгрузки приводили к снижению эффективности использования вагонного парка за счет возможных излишних пробегов порожних вагонов, необеспечению заявок на перевозку соответствующим типом подвижного состава, рассогласованию планов выгрузки вагонов и дальнейшего их использования.

АС ССП проектировалась как базисная система для реализации интеллектуальных технологий в оперативном управлении перевозочным процессом. Отличие интеллектуальных систем от кибернетических, в которых реализуется постоянно действующий (всегда активный) алгоритм решения одного типа задач, состоит в том, что в них есть оценивание, запоминание и учет собственного поведения. То есть интеллектуальная система – это целенаправленная система выбора доминирующей (очередной) задачи из допустимого для данной интеллектуальной системы класса, поиск решения такой задачи, закрепления опыта решения ее и, если необходимо, изменение допустимого класса задач.

Целью создания АС ССП является автоматизация задач сменно-суточного планирования погрузки-выгрузки, решаемая за счет оптимизации использования подвижного состава для удовлетворения потребности клиентов в грузовых перевозках. Сменно-суточное планирование состоит из ряда отдельных задач, взаимосвязанных между собой. В рамках данного проекта решаются задачи расчета плана погрузки, выгрузки и планирования прикрепления вагонов к заявкам на погрузку.

Создание АС ССП направлено на повышение качества эксплуатации вагонного парка, совершенствование взаимоотношений БЧ с грузовладельцами и собственниками подвижного состава.

АС ССП состоит из двух основных функциональных подсистем:

- ♦ подсистема сменно-суточного планирования погрузки;
- ♦ подсистема сменно-суточного планирования выгрузки.

Функциональную структуру АС ССП дополняет архив планов, содержащий плановые и контрольные

формы по планированию погрузки и выгрузки за все отчетные периоды глубиной 13 месяцев с момента запроса.

Структурная схема подсистем погрузки и выгрузки АС ССП представлена на рис. 2.

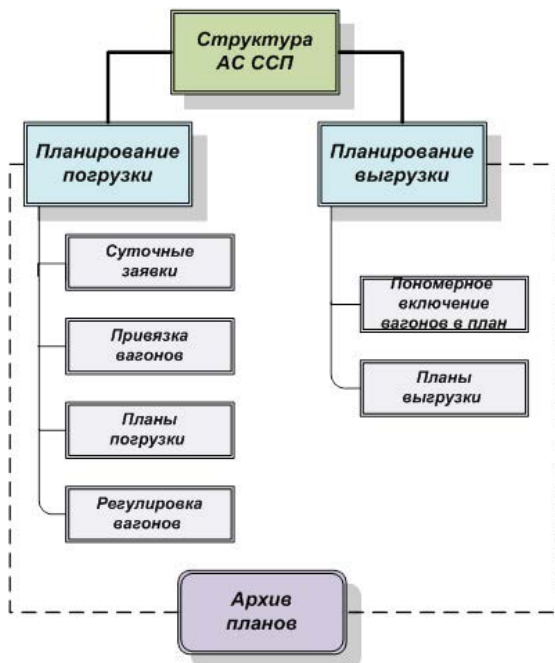


Рис. 2. Функциональная структура АС ССП

Задачи, решаемые в АС ССП, разделены на три компонента:

- «Управление и регистрация информации»;
- «Планирование»;
- «Контроль и анализ».

Компонента «Управления и регистрации информации» обеспечивает решение следующих задач:

- пономерную привязку порожних вагонов к заявкам на перевозку грузов;
- пономерную привязку порожних вагонов по назначениям плана формирования для решения задачи их регулирования;
- передачу исходной информации в компоненту «Планирование»;
- предоставление динамической информации в компоненту «Контроль и анализ».

«Планирование» обеспечивает решение следующих задач:

- разработку сменно-суточных планов погрузки и выгрузки по объектам: станции, отделения дороги, районы управления, железная дорога;
- согласование, корректировку и контроль разработки сменно-суточного плана погрузки и выгрузки на всех уровнях управления;
- предоставление аналитической информации для решения задачи планирования погрузки и

выгрузки на всех уровнях управления;

- предоставление динамической информации в компоненту «Контроль и анализ».

Подсистема «Контроль и анализ» включает задачи:

- динамический контроль состояния объектов управления, связанных с решением задачи управления процессом погрузки и выгрузки;
- предоставление результатов и анализ процесса разработки сменно-суточного плана погрузки и выгрузки на всех уровнях управления.

При проектировании АС ССП применялся процессный подход описания функционирования системы. Для этого на основании СТП 09150.15.073-2008 «Порядок планирования поездной и грузовой работы Белорусской железной дороги» установлены основные бизнес-процессы сменно-суточного планирования, которые включают:

- сбор и предоставление исходных данных для разработки сменно-суточного плана погрузки;
- разработку и согласование проекта суточного плана погрузки;
- утверждение суточного плана погрузки дороги и подразделений;
- разработку и утверждение плана погрузки на 1-ую смену;
- разработку и утверждение плана погрузки на 2-ую смену;
- сбор и предоставление данных о дислокации вагонов с местным грузом из ВМД;
- последовательное установление плановых значений в процессе разработки суточного плана выгрузки и передача их на вышестоящие уровни разработки суточного плана выгрузки;
- последовательная корректировка значений суточного плана выгрузки и передача их на нижестоящие уровни управления;
- разработку и утверждение сменных планов выгрузки (на 1-ую и 2-ую смены) с передачей на нижестоящие уровни управления.

Следует отметить наличие тесных информационных и функциональных взаимосвязей между различными бизнес-процессами.

Для каждого бизнес-процесса регламентированы цели, период реализации, функции и необходимые исходные данные.

Описание реализации каждой из функций бизнес-процесса выполнено в виде сценариев, в которых установлены основные технологические операции, их исполнители (в качестве исполнителя, в том числе, может фигурировать автоматизированная система) и источники информации, необходимой для выполнения каждой из операций.

Для примера на рис. 3 приведен сценарий реализа-

ции функции «Разработка и согласование проекта суточного плана погрузки»

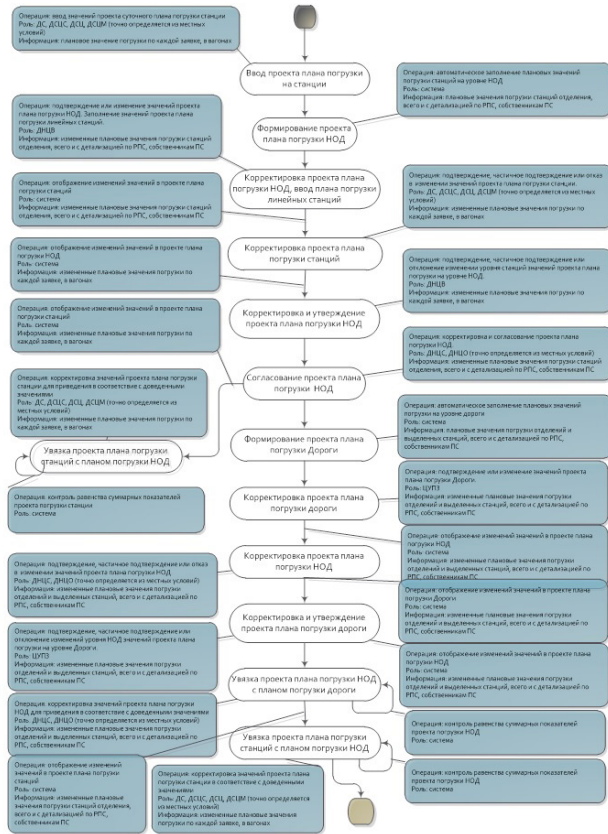


Рис. 3. Разработка и согласование проекта суточного плана погрузки

АС ССП функционирует на трех уровнях – линейном, отделенческом и дорожном. Пользователи системы аналогичным образом подразделяются на три группы, соответствующие уровням функционирования системы в целом:

пользователи уровня станции (независимо от подразделения станций на опорные и нет и, соответственно, прикрепления за опорными станциями функциональных возможностей планирования и управления данными за прикрепленные к ней станции);

пользователи уровня отделения дороги (без подразделения полномочий по возможностям управления данными по районам управления местной работы в случае их наличия на отделении);

пользователи уровня дороги (уровень ЦУП).

По каждой реализуемой в АС ССП функции установлен порядок взаимодействия пользователей всех уровней. Например, на рис. 4 приведен порядок возможных действий пользователей при согласовании плана погрузки.

Особое внимание при создании системы уделялось максимальному использованию уже действующих на Белорусской железной дороге информационных си-

стем. Это, с одной стороны, позволило снизить затраты на разработку, а с другой – позволило ускорить процесс «привыкания» пользователей к новой системе.

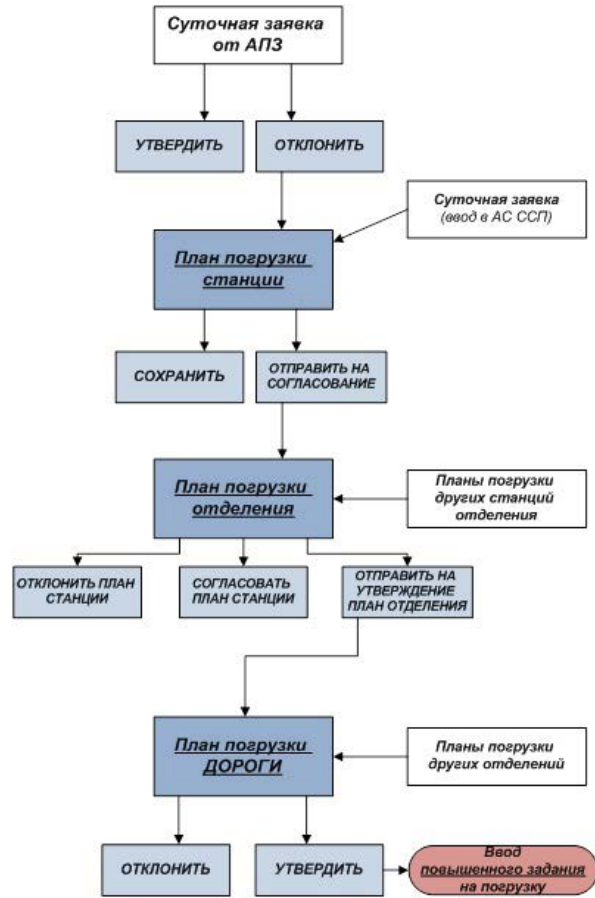


Рис. 4. Порядок возможных действий пользователей при согласовании плана погрузки в АС ССП

Исходными данными для сменно – суточного планирования в АС ССП являются месячные заявки ГУ-12 из системы АС «Месплан», суточные заявки на погрузку от клиентов железной дороги из системы АПЗ, технические нормы погрузки и выгрузки из подсистемы ТНЭРД, эталонные данные из классификаторов подсистемы ПЭ НСИ, а также набор справочных и оперативных данных о вагонах из системы ИАС ПУР ГП: паспортные данные о вагонах из картотеки, оперативная дислокация вагонов, операции по погрузке и выгрузке вагонов, перевод вагонов в рабочий/нерабочий парк и другие характеристики, необходимые для автоматизации процессов сменно-суточного планирования погрузки и выгрузки дороги.

Определенный интерес представляет реализованная в АС ССП функция определение плана выгрузки НОД на предстоящие (плановые) сутки в условиях ограниченной (неполной) исходной информации.

Для расчета плана выгрузки отделения используются следующие данные:

- $U_{ост}$, повагонное наличие вагонов с местным грузом, не включенных в план выгрузки на текущие сутки после его утверждения, на отделении (для выделенных станций отдельно и по остальным станциям отделения в сумме) на момент разработки плана выгрузки на предстоящие сутки $t_{пл}$;
- $U_{б.подх}$, повагонный ближний подход (наличие на каждом отделении) вагонов с местным грузом для каждого отделения дороги и выделенных станций в момент $t_{пл}$;
- $U_{д.подх}$, повагонный дальний подход (за пределами дороги) вагонов с местным грузом для каждого отделения дороги и выделенных станций в момент $t_{пл}$.

После завершения плановых суток в 17:00 (следующие отчетные сутки) каждый вагон проверяется на наличие проведенной с ним операции выгрузки в плановые сутки и суммированием определяется общее число вагонов, с которыми за плановые сутки произведена операция выгрузки: $U_{ост(+)}$, $U_{б.подх(+)}$, $U_{д.подх(+)}$ вагонов.

Определяется доля вагонов, с которыми выполнялась выгрузка (отношение числа вагонов, зарегистрированных в БД, с которыми производилась выгрузка к общему числу вагонов, зарегистрированных в БД):

$$k_{ост} = \frac{U_{ост(+)}}{U_{ост}}; k_{б.подх} = \frac{U_{б.подх(+)}}{U_{б.подх}}; k_{д.подх} = \frac{U_{д.подх(+)}}{U_{д.подх}},$$

а также определяется коэффициент превышения отчетной выгрузки $U_{в}$ (общее число выгруженных вагонов) за счет вагонов, сведений о которых не имелось в момент $t_{пл}$:

$$k_{доп} = \frac{U_{в}}{U_{ост(+)} + U_{б.подх(+)} + U_{д.подх(+)}}$$

Коэффициенты рассчитываются для каждого отделения и каждой выделенной станции отдельно. Итого устанавливается 232 коэффициента.

Статистические сведения о значениях $k_{ост}$, $k_{б.подх}$, $k_{д.подх}$, ... сохраняются в БД за период не менее 30 предыдущих суток.

Для каждой статистической выборки рассчитываются средние значения $k_{ост}^{ср*}$, $k_{б.подх}^{ср*}$, $k_{д.подх}^{ср*}$, $k_{доп}^{ср*}$ и среднеквадратические отклонения.

Планируемое значение выгрузки на предстоящие сутки определяется следующим расчетом:

$$U_{в}^{пл} = k_{доп}^{ср*} (k_{ост}^{ср*} U_{ост.пл} + k_{б.подх}^{ср*} U_{б.подх} + k_{д.подх}^{ср*} U_{д.подх}),$$

где - $U_{ост.пл}$ планируемый остаток вагонов с местным грузом на отделении дороги на 17:00, определяемый как разность между наличием вагонов с местным грузом на момент разработки плана $t_{пл}$ и планируемой выгрузкой вагонов в текущие сутки.

Применение данной функции позволило существенно повысить точность разрабатываемых планов выгрузки. В АС ССП реализованы и другие элементы интеллектуальных технологий. Например, корректировка плановых показателей работы подразделений на 2-ю смену в зависимости от реализации показателей за 1-ю. Или формирование сменно-суточных планов в условия ручного ввода повышенного задания на погрузку. Структура АС ССП позволяет и в дальнейшем продолжить работы по интеллектуализации планирования, в том числе за счет реализации процедур выбор сценариев реализации функций в зависимости от состояния проблемной среды функционирования.

В настоящее время АС ССП установлена и активно используется на всех объектах Белорусской железной дороги, участвующих в сменно-суточном планировании погрузки-выгрузки (станциях, отделениях, в Центре управления перевозками). Экономическая эффективность от создания АС ССП достигается за счет улучшения количественных и качественных показателей работы Белорусской железной дороги.

Установлено, что за рассмотренный период с 2014 по 2019 г. проект обеспечит порядка 1 558 тыс. долл. чистого экономического эффекта, срок окупаемости проекта составляет 2,2 года, внутренняя норма рентабельности составляет 45,67%, что превышает показатель рентабельности собственного капитала дороги, индекс рентабельности проекта больше 1. Таким образом, проект можно отнести к экономически эффективным.

В настоящее время на Белорусской железной дороге рассматривается вопрос о продолжении работ по развитию КС УПР БЧ, и в частности, о разработке системы сменно-суточного планирования поездной работы.

Абрамов А.А., ОАО «НИИАС», г. Москва

Немцов Э.Ф., ООО «ПрограмПарк», г. Москва

Еремин А.С., Научно-производственная компания «Мультиагентные технологии», г. Самара

Автоматизация разработки графиков движения поездов на основе мультиагентных технологий

1. Введение

Задача разработки графика движения поездов решается регулярно в организациях - владельцах инфраструктур железных дорог (в России – ОАО «РЖД»). Нормативный график движения поездов формируется 1 раз в год с корректировкой на летний период, варианты графики движения – гораздо чаще, под каждое «окно» для проведения ремонтно-путевых работ. Для повышения эффективности работы сети железных дорог, особенно в условиях сильных колебаний размеров движения, график движения может разрабатываться еще чаще, вплоть до каждой смены с актуализацией по трехчасовым периодам.

Разработка графика движения поездов в масштабе ОАО «РЖД» - трудоемкий и длительный процесс, требующий многократных циклов согласований между участниками процесса.

В настоящем докладе предлагается новый подход к автоматизации, основанный на мультиагентных технологиях, который позволяет сократить трудоемкость и длительность процесса разработки графика. Работа выполняется в рамках создания производственно-технического комплекса «Интегрированная система управления железнодорожного транспорта» (ПТК ИСУЖТ) ОАО «РЖД».

2. Железнодорожный опыт

Научные исследования в области применения ЭВМ для автоматизированного построения и оптимизации графика движения поездов ведутся с 1950-х годов. В этой связи необходимо отметить труды А.П. Петрова, Е.В. Ададунова (1961 г.), Б.А. Завьялова (1961 г.), Б.Дел Рио (1962 г.), А.Г. Барткуса (1694 г.), К. Суворова (1966 г.), И.Т. Козлова и Г.Н. Тихонова, Д.Ю. Джалилова.

К сожалению, можно констатировать, что эти разработки в настоящее время не применяются при разработке графика движения. По всей видимости, основной причиной этого является пакетный режим работы предлагаемых алгоритмов – они выдают результат работы «с нуля», и пользователь физически не имеет возможность указать алгоритму нужное направление поиска. Наибольший успех, вероятно, будут иметь

системы, обеспечивающие максимум интерактивности. Для этого должны быть разработаны алгоритмы, позволяющие взять частичный график движения, разработанный пользователем, и продлить его автоматически, а затем позволить пользователю поменять некоторые параметры построения и тут же отобразить полученный результат. При этом должен создаваться эффект «предугадывания» машиной замысла пользователя на несколько (или много) шагов вперед.

Говоря не о научных исследованиях, а об информационных системах, необходимо отметить наиболее распространенные в мире системы RailSys, OpenTrack, и, частично, MultiRail¹. В них успешно решаются следующие вопросы:

1. Унификация моделей инфраструктуры на основе неформального стандарта RailML (Railway Modeling Language) иерархического XML-подобного описания инфраструктуры, подвижного состава и расписаний.
2. Централизованное хранение данных, обеспечивающее единство данных и ускоряющее согласование.
3. Детализация разработки графиков до самого нижнего уровня: блок-участков, стрелок, станционных путей (вместе с тем, процессы грузовой работы на станциях не моделируются вовсе).
4. Используемые модели реалистично обнаруживают «коллизии» между поездами автоматически, на основе путевого развития станций, и не требуют заранее рассчитанных интервалов безопасного следования поездов (таких, как интервал одновременного прибытия на станцию). Т.е. эти параметры больше не требуется рассчитывать вручную.
5. Встроенные возможности имитационного моделирования позволяют оценить резервы, заложенные в графике, и, таким образом, оценить выполнимость графика до того, как по нему проследует первый поезд.

Следует отметить, что все вышеперечисленные системы помогают пользователю обнаруживать ошибки при построении графиков, но не прокладывают по-

¹ Де-факто стандарт ОАО «РЖД», АРМ инженера-графиста разработки ГВЦ ОАО «РЖД» (коллектив авторов под руководством Н.А. Ключева), несмотря на богатые функции редактирования и отображения графика, практически не автоматизирует саму разработку графика, поэтому не входит в перечень.

езда сами. А вместе с тем, именно прокладка поездов является достаточно трудоемким процессом, в особенности, если имеются жесткие ограничения: по количеству путей для скрещения поездов на станциях или по количеству путей на перегонах. Так, однопутный участок справедливо считается сложной, нелинейной задачей для графиста.

Таким образом, имеются различные направления автоматизации построения графика и ни одно из направлений не претендует на полноту решения задачи.

2. Опыт других отраслей

Процесс разработки графика движения имеет прямую аналогию с процессом проектирования в машиностроении:

1. Инженеры-конструкторы в машиностроении также, как и инженеры-графисты ОАО «РЖД», работают над конструкцией изделия коллективно. Для сложного изделия (автомобиль, самолет, судно) их количество может достигать 500 человек одновременно на один проект.
2. Разработка начинается с анализа потребностей потребителя (ср. с прогнозом грузопотоков в ОАО «РЖД») и выполняется на базе предыдущих проектов (нормативный график предыдущего года). Активная работа конструкторов начинается с задания на проектирования (приказ на разработку графика движения), по мере подготовки проекта переходит в стадию подготовки производства (совещания по подготовке к принятию нового графика движения).
3. На определенном этапе конструкторская документация «замораживается» (утверждается), как и нормативный график движения.

4. В ходе производства в конструкцию вносятся многочисленные изменения, повышающие ее технологичность и эксплуатационные характеристики (корректировка графика для летнего периода).

В машиностроении автоматизация проектирования, в силу большей степени формализации задач, проходила более интенсивно и глубоко, чем в железнодорожной отрасли. Эволюция систем автоматизированного проектирования (САПР) осуществлялась от CAD/CAE систем (машинное черчение, машинные расчеты) через PDM системы (управление документооборотом конструкторской документации) до PLM систем управления жизненным циклом изделия (рис. 1).

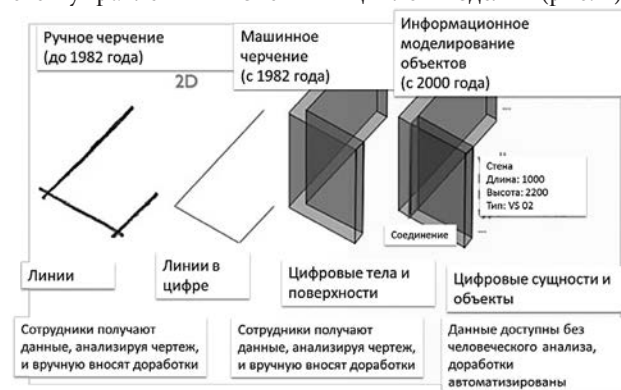


Рис. 1. Эволюция САПР-систем

Современные САПР-решения для машиностроения (например, от компаний Dassault, Siemens) уже в самом начале проектирования могут выявить проблемы, обычно выявляемые на гораздо более поздних стадиях разработки: автоматически выполняют анализ собираемости изделия, определяют области наложения, передают изменения от разработчика одного компонента к разработчику смежного, выполняют

Таблица 1.

Потенциал автоматизации разработки графика за счет перехода от задач простой отрисовки графика к задачам создания объектов и формирования связей между ними

Элемент информационной модели движения поездов	Преимущества для пользователя
Топология сети железных дорог	Контроль заполнения и непротиворечивости расписаний поездов от станции формирования до станции назначения.
Временные параметры перегонов и участковых станций	Автопрокладка нитки поезда без учета уже проложенных. Автокоррекция всей нитки при изменении одной точки.
Данные длин и числа путей по раздельным пунктам	Контроль обгонов и скрещений. Автопрокладка обгонов и скрещений.
Межпоездные интервалы	Автопрокладка нитки поезда с учетом уже проложенных. Автокорректировка расписания при изменении одной точки.
Показатели графика движения поездов (размер движения, участковая скорость, маршрутная скорость, неравномерность и др.)	Подбор графиков из архива по заданным параметрам. Автоматизация сравнения различных версий графиков. Контроль улучшения графика в ходе согласований.
Задание на разработку графика движения поездов	Контроль соответствия результата исходной задаче. Автоматическая прокладка поездов под заданные размеры движения и с заданными критериями оптимизации.

прочностные и температурные расчеты и т.п. Решения поддерживают формализацию бизнес-процессов разработки, зная, в каком порядке, кто и что должен сделать в случае возникновения определенных ситуаций.

Все эти возможности обусловлены прежде всего тем, что вместо рисования графических примитивов – линий, поверхностей и тел, современные системы машиностроения работают с объектами и их взаимосвязями, т.е. фактически с онтологией предметной области. Применительно к задачам построения графика движения, аналогичный подход может привести к следующим возможностям автоматизации (табл. 1).

Эти возможности не реализованы ни в одной из существующих систем. Во многом это обусловлено трудностями формализации предметной области для обеспечения применимости классических алгоритмов. В данной статье для решения задач автоматизации применяется мультиагентный подход.

3. Мультиагентный подход

В последние десятилетия в связи с бурным ростом компьютерных сетей и подключением в них все большего количества устройств невозможность централизованной обработки данных становится очевидной и все чаще для информационно-управляющих систем на РЖД применяется сетевый принцип и мультиагентные технологии.

При решении задачи построения графика агенты физических сущностей – станций, поездов, путей – объединены в одну p2p сеть (от англ. «peer-to-peer» – «каждый с каждым» и «равный с равным»), получают друг у друга все необходимые сведения о состоянии и динамике и согласуют принимаемые решения путем выявления конфликтов и проведения переговоров.

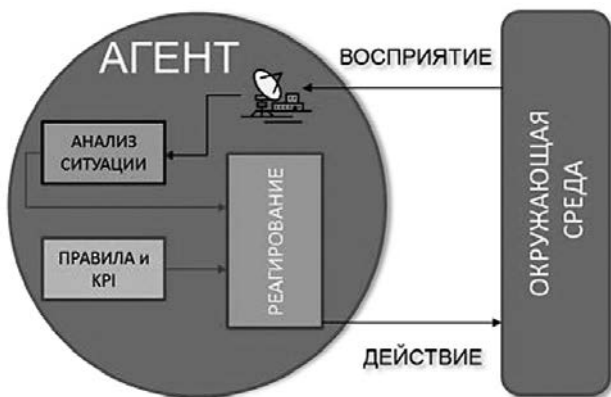


Рис. 2. Принципиальная схема одного агента мультиагентной системы

Первые разработки в нашей стране в этом направлении выполнены в НПК «Мультиагентные технологии» в тесной кооперации с ОАО «НИИАС» в рам-

ках создания интеллектуальной системы управления железнодорожным движением на платформе «Вектор» (ИСУЖТ), в котором агенты станций, поездов и участков путей в реальном времени самоорганизуются в расписание, гибко реагирующее на возможные нештатные ситуации. Разработанная система находится в опытной эксплуатации на полигоне Санкт-Петербург – Москва.

В создаваемой для решения задачи мультиагентной системе предлагается заданный размер движения и данные о «ценности» конкретных поездов, всю совокупность инфраструктуры и тяговых ресурсов представлять ПВ-сетью, представляющей собой самоорганизующийся план распределения ресурсов по задачам. Возникновение любого нового события может запускать адаптивную перестройку связей агентов потребностей и возможностей, которая заканчивается нахождением консенсуса агентов, в котором ни один агент не может более улучшить ситуацию.

Основные типы агентов разрабатываемой системы представлены в табл. 2.

В случае построения графика автоматически в начале работы системы для каждого участка инфраструктуры создается участковый агент. Данный агент получает информацию о требуемых объемах движения и порождает поездных агентов в необходимом количестве, добавляет в рой агентов перегонов и разделительных пунктов и инициирует начало взаимодействия агентов внутри своего роя. Пример взаимодействия приведен на рис. 3.

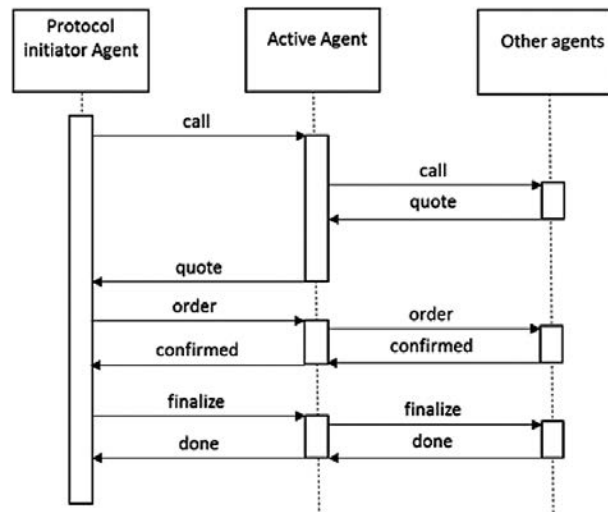


Рис.3. Один из протоколов переговоров между агентами

В ходе этого взаимодействия агенты предлагают варианты прокладки нитей графиков по участку, исходя из своих интересов. По этим вариантам, заданным набором параметров прокладки поездных нитей, очередности занятия ресурсов, последовательностей

Таблица 2.

Основные классы агентов мультиагентной системы для адаптивного планирования графиков движения поездов

Агент	Тип	Цели и задачи
Агент планируемого участка	Управляющий	Обеспечить требуемый размер движения, управление участковым роом агентов, взаимодействие с агентами соседних участков, агентом локомотивного депо, получение информации об исполненном движении
Агент поезда	Агент потребности	Проследовать по участку с минимальными стоянками, взаимодействие с агентами поездов на участке, поиск ресурсов для проследования
Агент «окна» для ремонтных работ	Агент потребности	Занять перегон для проведения ремонтных работ, взаимодействие с поездными агентами, поиск ресурсов для выполнения
Агент поезде-перегона	Агент потребности	Контроль интервалов: «Я должен ехать по правилам» Оценка резерва времени до следующего поезда: «А вдруг я здесь опоздаю!» Оценка резерва на нагон: «А вдруг я приду с опозданием!»
Агент раздельного пункта	Агент возможности	Пропустить требуемые размеры движения, закладка резервов на проследование по станции, решение конфликтов
Агент перегона	Агент возможности	Контроль путей на раздельном пункте: «Вы не разъедетесь!» Оценка оптимальности выбранной съемы скрещения: «Ты – подожди, а ты - проезжай!»

скрещивания и пр., система автоматически прокладывает поездные графики движения. Таким образом, агент может получить оценку предлагаемого ему варианта размещения поездов на участке, который можно оценить по ключевому показателю эффективности (Key Performance Indicator, KPI) – некоторой величине, являющейся совокупностью требуемых характеристик графика.

После согласования участкового решения внутри роя, участковый агент начинает взаимодействовать с соседними участковыми агентами для согласования на границах участка.

В случае построения системы вручную или автоматизированно агенты начинают работать после каждого действия пользователя, уведомляя его об обнаруженных проблемах и предлагая варианты решений.

4. Архитектура АРМ графиста ПТК ИСУЖТ

Архитектурно система состоит из четырех блоков:

- Веб-браузер с передаваемой ему по запросу клиентской частью приложения (HTML/javascript), взаимодействующей с веб-сервером АРМ графиста по протоколу AJAX.
- Веб-приложение, развернутое на веб-сервере платформы Вектор-М ПТК ИСУЖТ и обеспечивающее интерактивное построение графика, общую координацию компонент АРМ графиста.
- Онтологии, обеспечивающей хранение графиков и инфраструктуры, доступ к которой реализован по принципам REST API.

- Планировщика, выполняющего ресурсоемкие задачи прокладки.

Система функционирует на платформе Вектор-М в составе ПТК ИСУЖТ. Платформа Вектор-М (разработчик ООО «ПрограмПарк») предназначена для комплексной автоматизации процессов крупных предприятий и позволяет создавать распределённые системы произвольной топологии. Платформа обеспечивает связь между онтологией, веб-приложением и планировщиком, авторизацию пользователей, горячее резервирование. Место указанных компонент АРМ графиста в архитектуре ПТК ИСУЖТ приведено на рис. 4.

Результаты и выводы

В настоящий момент в системе реализован следующий функционал:

1. Автоматическое построение графика движения поездов на однопутных участках.
2. Автоматизированное построение графика движения на однопутных участках по технологии от ограничивающего перегона.
3. Добавление окон ремонтных работ.
4. Корректировка нормативов движения поездов.
5. Стыковка графиков движения соседних участков.
6. Интерактивная корректировка графика движения в «один клик» за счет перетаскивания участков поездов мышью.
7. Добавление поездов в существующий график движения.
8. Удаление поездов из графика движения.

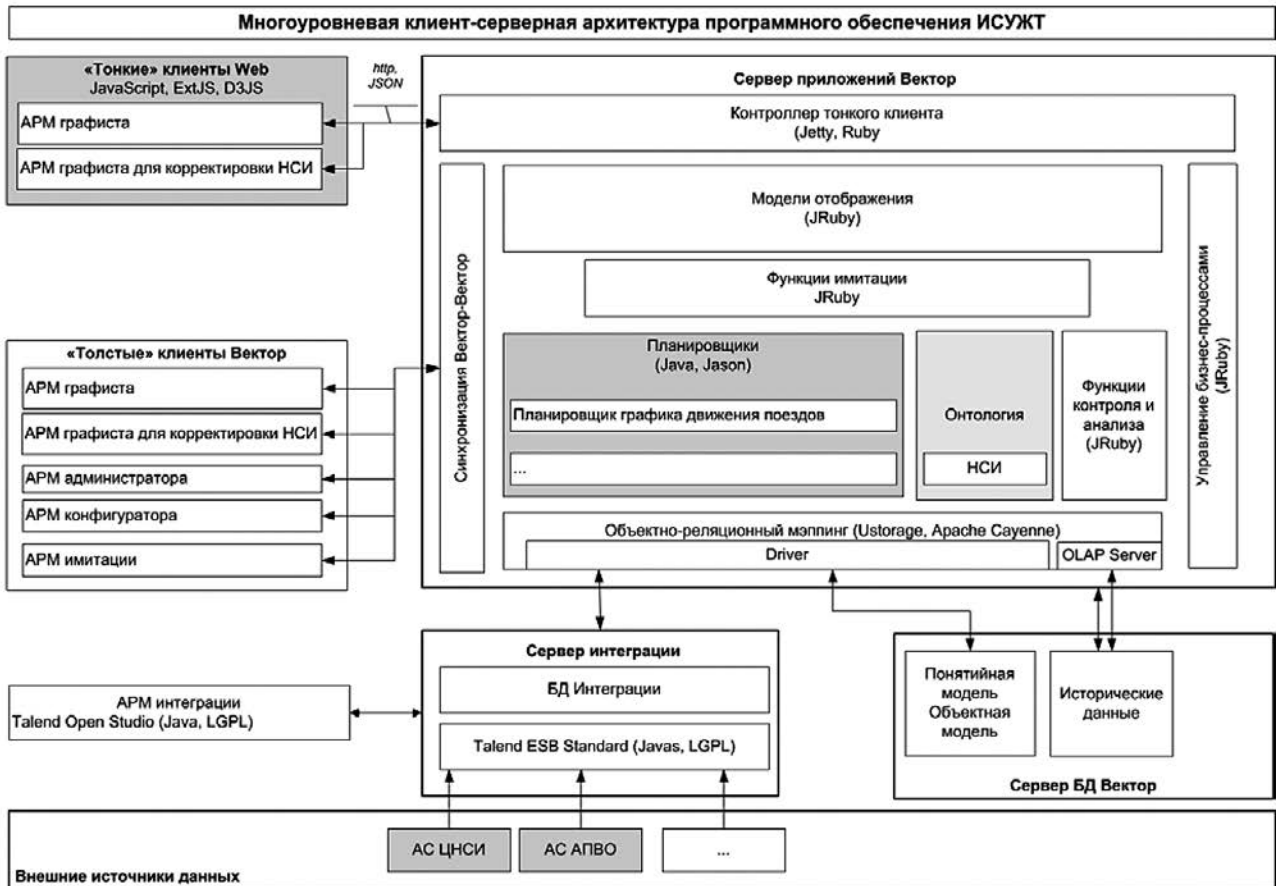


Рис.4. АРМ графиста в архитектуре ПТК ИСУЖТ

9. Предоставление пользователю выбора вариантов графика движения.
10. Автоматическая оптимизация текущего графика движения поездов.
11. Автоматический расчет показателей, характеризующих качество графика движения.
12. Импорт графика движения в различные форматы, включая .lgx.
13. Экспорт графиков движения из различных форматов, включая .lgx и .asrvg.

Примеры экранных форм приведены на рис. 5.

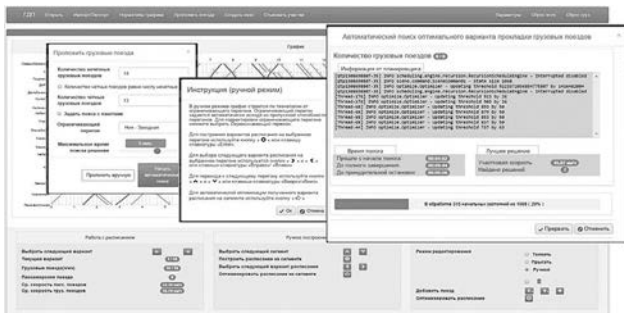


Рис.5. Примеры экранных форм АРМ графиста ПТК ИСУЖТ

При сравнении графика движения поездов, построенного системой в автоматическом режиме, с графиком движения поездов, построенного графистом вручную, без использования каких-либо средств автоматизации было выявлено, что система позволяет находить более эффективные решения.

Так, участковая скорость на участке «Лена Восточная – Северобайкальск» при ручном построении графистом была равна 39 км/ч, а в варианте, построенном системой – 42 км/ч. Максимальное количество поездов, проложенных графистом при ручном построении – 11 пар, при работе системы – 17 пар.

Следует отметить, что при построении своего решения графист может учитывать некоторые сложные для формализации критерии, которые могут не учитываться системой. Однако даже в этом случае, график движения, построенный системой, может служить первым приближением для будущего графика, сводя задачу графиста не к построению графика «с нуля», а корректировке и доводке предложенного системой графика.

Использование системы в качестве основного инструмента графиста при построении графика движения поездов позволит в разы сократить время разра-

ботки итогового графика, одновременно повысив его качество и показатели движения.

Дальнейшее развитие комплекса АРМ графиста ПТК ИСУЖТ следует ожидать в трех взаимодополняющих направлениях:

- Ускорение наиболее рутинных действий графиста за счет удобства работы и максимального использования моделей, данных для подсказок пользователю (например, перетаскивание границ окна «мышкой» с автоматической перепрокладкой поездов на места,

освободившиеся при сдвиге «окна» и перемещения их с места, занимаемого при сдвиге окна).

- Явная поддержка основных бизнес-процессов, связанных с разработкой графиков движения, на уровне статусов и состояний графиков, заданий на разработку, типовых схем потоков данных при разработке и согласованиях графиков.
- Доводка алгоритмов автоматического планирования на различных участках сети железных дорог ОАО «РЖД».

Машталер Ю.А., Матвиенко В.А., Алтунин В.П., ОАО «НИИАС», г. Москва
Такмазьян А.К., ООО «Програмпарк», г. Москва

Мультиагентное решение задачи о суточном планировании назначения локомотивных бригад на явку в депо

Мультиагентные методы эффективно используются при решении задач оптимального планирования. Повышение быстродействия при распределенном подходе достигается за счет редукции большой централизованной задачи к множеству более мелких задач пониженной сложности и уменьшения вычислительной трудоемкости каждой из них путем замены глобальной целевой функции – локальными (как правило, более простыми).

В настоящей работе с использованием мультиагентной среды Jason решается задача о планировании назначения локомотивных бригад (ЛБ) на явку в депо на следующие железнодорожные сутки (с 18:01 текущих календарных суток до 18:00 следующих календарных суток).

1. Постановка задачи

Для обеспечения вывоза поездов на участке необходимо обеспечить локомотивы требуемым количеством локомотивных бригад (ЛБ). Для каждого депо на участке имеется наряд-задание по явке приписанных бригад в депо в течение планируемых суток. Каждое

наряд-задание для депо разделяется по участкам работы (обращения) локомотивных бригад (УОЛБ). Кроме того, наряд-задания для каждого УОЛБ разделяются по трехчасовым интервалам в течение железнодорожных суток. Таким образом, задача сводится к назначению потребного количества бригад на явку по каждому трехчасовому интервалу в течение планируемых железнодорожных суток для каждого УОЛБ.

Назначение бригад на явку выполняется строго с соблюдением трудового законодательства и приказа №7 от 5 марта 2004 г, отражающего особенности режима рабочего времени и времени отдыха для работников в составе локомотивной бригады (ЛБ). При назначении бригады на явку возможны ситуации нехватки бригад, когда бригаде будет сокращен домашний отдых или отменен выходной день. Наоборот, при избытке бригад, возможно продление для бригады домашнего отдыха или предоставление внеочередного выходного дня.

Продолжительность междуменного домашнего отдыха вычисляется как $ДО = КО * ПР - ПО$, где ПР – полное время работы бригады с локомотивом, ПО – время отдыха бригады в пункте оборота, КО – коэффициент отдыха (обычно равный 2.6). Однако

минимальный домашний отдых бригады не может составлять менее 16 часов.

Выходной день бригаде предоставляется за счет добавления 24 часов отдыха к планируемому отдыху после смены. Минимальная продолжительность выходного дня не может составлять менее 42 часов. Если бригада, находясь на выходном дне, по какой-либо причине отдыхает менее 42 часов, то ей должен быть предоставлен дополнительный выходной день взамен сорванного.

Кроме того, должны учитываться некоторые другие особенности работы ЛБ, отраженные в Приказе №7, например, нельзя выводить бригаду на работу в ночную смену три смены подряд. Ночной считается смена, в которую бригада находится на работе в любое время с 0 до 5 часов.

При формировании текущего среза локомотивных бригад, приписанных к данному депо, считается, что бригада находится в одном из следующих состояний:

1. Бригада находится в депо и ожидает отправления с локомотивом;
2. Бригада отправилась из депо и следует с поездом;
3. Бригада находится на отдыхе в пункте оборота ЛБ (ПОЛБ) и еще не назначена на отправление;
4. Бригада назначена и ожидает отправления с поездом или пассажиром из ПОЛБ в депо;
5. Бригада следует с поездом или пассажиром в депо
6. Бригада прибыла в депо;
7. Бригада находится на домашнем отдыхе или выходном дне;
8. Бригада находится на любом другом отвлечении от работы (больничный, отпуск, повышение квалификации и т.п.).

Поскольку минимальный междусменный отдых по нормативу составляет 16 часов, то, при условии запуска алгоритма планирования хотя бы дважды в сутки, мы можем при отборе бригад на явку в следующую смену рассматривать только категории с 4 по 7. При этом, все категории бригад рассматриваются в прогнозе на сутки, следующие за планируемыми (т.н. вторые сутки после текущих), и на третьи сутки. Таким образом, кроме плана составляется также и прогноз выхода бригад на период, следующий за планиваемым. Это позволяет нарядчику контролировать явку всего работающего контингента по данному депо.

II. Входные и выходные данные и критерии планирования

Входными данными для планирования являются:

1. Наряд-задание на содержание ЛБ на плановые сутки по депо приписки с указанием плановых участков работы ЛБ;

2. Пофамильный явочный состав ЛБ, приписанных к основному депо, с указанием текущего положения, состояния и истории операций;
3. Разрешение на работу по участкам работы, согласно данным контрольно-инструкторских поездок (КИП);
4. Фактические данные о времени работы и отдыха ЛБ с начала месяца, проценте выработки, основанном на индивидуальном задании – с учетом отпуска, больничных и других отвлечений в течение месяца (года), данные о переработке ЛБ (нарастающим итогом с начала года);
5. Нормы времени отдыха (домашнего и в пункте оборота) и выходного дня ЛБ (продолжительность)
6. Нормативы накладных времен по операциям следования ЛБ (продолжительность выполнения операций);
7. Информация о часовом сдвиге между участком обслуживания и Москвой.

Из пофамильного явочного состава локомотивные бригады распределяются по 3-х часовым периодам и сменам в соответствии с наряд-заданием, согласно следующей приоритетности по группам:

- 1) Сначала ЛБ, у которых в плановых сутках завершится полный домашний отдых или выходной день;
- 2) ЛБ в состоянии следования с поездом или пассажиром назначением в пункт оборота, отдыхающие в пункте оборота или следующие обратно в основное депо, у которых после возвращения в основное депо в плановых сутках завершится полный домашний отдых;
- 3) ЛБ, у которых можно сократить в плановых сутках полный домашний отдых до минимального допустимого времени по Приказу №7;
- 4) ЛБ в состоянии следования с поездом или пассажиром назначением в пункт оборота, отдыхающие в пункте оборота или следующие обратно в основное депо, у которых после возвращения в основное депо можно сократить полный домашний отдых до минимального допустимого времени по Приказу №7;
- 5) ЛБ, находящиеся на выходном дне в плановых сутках.

При этом, для всех ЛБ в рамках одной группы устанавливается дополнительный приоритет - фактическая выработка (в процентах от индивидуальной нормы) с начала месяца и с начала года. Например, если в группе 1 имеется несколько ЛБ, то выбирается та, у которой фактическая выработка меньшая. Расчет времени отдыха ЛБ (домашнего и в пункте оборота) осуществляется на основании приказа № 7. Расчет времени работы ЛБ осуществляется с использованием нормативов накладных времен по операциям следования.

При отсутствии поинтервальных норм, распределение ЛБ должно осуществляться равномерно по 3-х часовым периодам в пределах каждой смены.

В ситуации избытка бригад та ЛБ, у которой фактическая выработка с начала месяца и с начала года превышает нормы и/или больше, чем у остальных ЛБ для данного участка работы, будет условно избыточной в плановых сутках и ей рекомендуется предоставить дополнительный выходной день или увеличить домашний отдых.

При формировании прогноза на вторые и третьи сутки учитывается лишь плановое время отдыха бригады и, таким образом, вычисляется время явки бригады в депо после отдыха.

III. Описание метода решения

Для решения задачи предлагается использовать многоагентный подход: один агент верхнего уровня *main* служит интерфейсом между «пользователем» (которым в данном случае, является плагин интеграционной платформы) и рабочей средой, состоящей из множества агентов нижнего уровня, сотрудничающих для поиска решения задачи.

При старте все данные загружаются в главный агент-интерфейс (*main*). После этого он создает вспомогательные агенты-депо (*depot*), передавая им только локальные для депо данные. Поскольку планирование бригад на явку ведется независимо по каждому депо, агенты-депо действуют автономно по отношению друг к другу. На основании своих локальных данных, агент-депо порождает агенты-бригады (*team*) и агенты-участки обращения локомотивных бригад (*direction*), передавая им их атрибуты и другие необходимые данные. Поскольку назначение бригад ведется с разбивкой по трехчасовым интервалам, то агент *direction*, в отличие от агента *team*, не является конечным агентом в данной иерархии, а имеет своими потомками агенты – трехчасовые интервалы (*part*), для которых также служит диспетчером данных и потоков вычислений. Даже если наряд-задание приходит лишь с разбивкой по сменам (а не по интервалам), то на данном этапе производится дальнейшее равномерное разделение наряд-задания на (по возможности) равные части по трех-часовым интервалам, и передача этих редуцированных заданий в агенты *part*.

Таким образом, весь процесс разбивается на два этапа: первый – создание иерархии агентов, загрузка данных и инициализация, производится агентами верхних уровней : *main*, *depot*, *direction*. Второй этап – собственно планирование – происходит при взаимодействии агентов нижнего уровня между собой: *team* и *part*, которые, обмениваясь сообщениями, производят

назначение бригад на соответствующий временной интервал соответствующего УОЛБ (см. рис. 1).

Агент-интервал (*part*) хранит в своей памяти наряд-задание на заставку бригад на свой временной интервал на своем УОЛБ. Он является реактивным агентом, т.е. запускается лишь при запросе от агента-бригады (*team*) о наличии свободных вакансий в наряд-задании. Этот агент управляет процессом назначения, используя внутренние булевы переменные *Vacant* и *Busy*. Если первая из них имеет значение *true*, это значит наличие вакансии, и бригада назначается на явку в данный интервал безусловно. В противном случае выясняется, имеет ли вторая переменная значение *true*: т.е. агент сейчас занят рассмотрением другой заявки. Тогда бригаде отсылается сообщение «*busy*» – временный отказ, с возможностью позднейшего повторного обращения с той же самой заявкой, когда значение переменной *Busy* будет *false*.

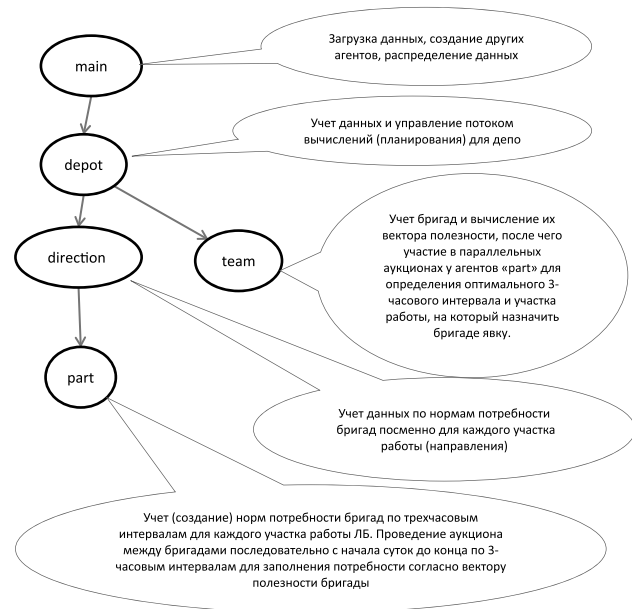


Рис. 1. Схема агентов в задаче о назначении бригад

Наконец, когда значение обеих переменных равно *false*, это означает, что все свободные вакансии по заставке на этот интервал заняты, и в данный момент нет других обрабатываемых заявок. Тогда агентом вызывается обработчик оценки возможности замены одной из уже заставленных в данный интервал бригад на вновь заявленную. Оценка происходит согласно функции полезности заставки бригады на данный интервал данного УОЛБ. Данная функция имеет векторную область значений, и вычисляется при инициализации агента-бригады.

Агенты-бригады (*team*) являются активаторами процесса планирования. Агент депо после инициали-

зации своих потомков и получении от них сообщений о готовности, запускает процесс планирования путем рассылки агентам бригад сообщения о начале работы. Каждый агент бригады имеет у себя список интервалов-участков, на которые он может теоретически быть назначен. Агент бригады пробегает по данному списку, посылая сообщения-заявки на постановку себя на данный интервал. Агент интервала рассматривает эти заявки и реагирует так, как было описано выше.

Каждая заявка содержит вектор-функцию, описывающую полезность назначения данной бригады на данный интервал данного участка. Значение этой функции определяются в первую очередь тем, повлечет ли данное назначение сокращение отдыха или срыв бригады с выходного дня. В последних двух случаях полезность безусловно ниже, чем при полном отдыхе бригады (причем при срыве с выходного дня она ниже, чем при сокращении отдыха). При равных условиях полноты (сокращения) отдыха, функции полезности различаются по проценту выработки бригадой рабочей нормы от начала месяца (или года): чем ниже выработка, тем выше полезность бригады.

Кроме того, необходимо учитывать, что существуют ограничения для разных бригад по работе на разных УОЛБ – проще говоря, чтобы быть назначенной на данный УОЛБ, бригаде нужно иметь разрешение по работе на нем, по результатам контрольно-инструкторских поездов (КИП). Таким образом, среди бригад возникает дополнительная иерархия по количеству разрешенных бригаде УОЛБ (для данного депо). Чем меньше число разрешенных для работы участков (это число должно быть больше нуля, иначе бригада не рассматривается для планирования), тем выше функция полезности у бригады. Это правило легко понять, если учесть, что в первую очередь нужно планировать именно бригады с наименьшим числом разрешенных участков работы, включающих данное депо.

Нужно при этом заметить, что планирование проводится в два этапа. Изначально функция полезности имеет векторный вид, где первая координата характеризует полноту отдыха бригады, вторая – процент выработки, и третья – для уже вернувшихся бригад – порядок их фактической постановки на явку по возвращении в депо. После первоначального плани-

рования выхода бригад проводится второй, корректирующий этап – где процедура взаимодействия бригад и интервалов в точности такая же, но с другой (скалярной) функцией полезности – учитывающей теперь только количество разрешенных участков работы при данном депо для данной бригады.

IV. Результаты

В результате работы мультиагентного алгоритма планирования на выходе получаем решение оптимизационной задачи по назначению бригад на явку. Локально для каждого интервала оптимальность следует по построению механизма отбора бригад при обслуживании заявок. Глобальная оптимальность обеспечивается монотонностью каждой из компонент функции полезности: действительно, для фиксированного участка с увеличением номера интервала функция полезности может только возрастать по всем координатам, как видно из ее построения.

Заключение

Предложен и реализован мультиагентный алгоритм оптимального планирования сменно-суточной заставки бригад на явку в депо, на следующие сутки. При планировании достигается оптимальность в смысле равномерности выработки рабочего времени бригад, равномерности коэффициента домашнего отдыха и регулярности предоставления бригадам выходного дня. Используемый алгоритм включает в себя решение задачи о назначениях путем переговоров агентов-исполнителей и агентов-задач. Планирование производится один раз в сутки в режиме реального времени и с достаточной для задачи скоростью – для депо время выполнения модуля составляет меньше одной минуты. Задача была реализована в рамках ввода в эксплуатацию первой очереди подсистемы управления тяговым хозяйством Восточного полигона.

Литература

1. «Положение об особенностях режима рабочего времени и времени отдыха, условий труда отдельных категорий работников железнодорожного транспорта, непосредственно связанных с движением поездов». Утверждено приказом МПС России от 5 марта 2004 г. N 7.

Ефремов Г.А., Ефремова А.П., ОАО «НИИАС», г. Москва

Управление движением поездов на полигонах Октябрьской дороги с помощью интеллектуальных многоагентных систем

Введение

Работа диспетчера связана с непрерывно возникающими конфликтами во время движения поездов (отклонения от графика, отказы технических средств, ремонтные работы и др.). Время реакции на события и на принятие решения диспетчером ограничено. Опыт каждого диспетчера непосредственно влияет на качество и скорость принятия решений. В настоящий момент практически отсутствуют системы поддержки принятия решений для поездных диспетчеров.

Отличительными особенностями направлений Санкт-Петербург — Москва, Санкт-Петербург — Буловская являются: 1) движение высокоскоростных пассажирских поездов 2) движение грузовых поездов по той же железнодорожной инфраструктуре, 3) высокая интенсивность движения.

Первая очередь задач проекта по созданию Единой интеллектуальной системы управления и автоматизации производственных процессов на железнодорожном транспорте – ИСУЖТ для пилотных полигонов Октябрьской дороги Санкт-Петербург – Москва, Санкт-Петербург – Буловская направлена на решение следующих актуальных проблем:

- возврат пассажирских поездов в график при возникновении их отклонений и нештатных ситуаций [1-3, 5];
- построение плана пропуска для неграфиковых грузовых поездов;
- обеспечение безопасности пропуска высокоскоростных поездов (контроль установки маршрутов, закрытия переездов, установки режимов высокоскоростного движения, недопущение скрещения поездов «Аллегро», «Сапсан» и грузовых поездов с негабаритными или сыпучими грузами).

В рамках проекта устранение отклонений от графика движения и решение возникающих конфликтных ситуаций формируется на основе многоагентных технологий [4, 7].

Новым полигоном для внедрения апробованных алгоритмов ИСУЖТ выбран участок Санкт-Петербург – Невель. Данный полигон является однопутным участком с многопутной вставкой в пригородной зоне Санкт-Петербурга. Основной задачей на этом полигоне является решение конфликтов и построение плана пропуска на однопутном участке с целью минимизации скрещений и повышения участковой скорости грузовых поездов.

ИСУЖТ на полигоне Октябрьской дороги

Характеристика полигонов Октябрьской дороги приведена на рис. 1. Подробное описание полигонов Санкт-Петербург — Москва, Санкт-Петербург — Буловская приведено в [4, 9]. Основная особенность данных направлений – смешанное движение: наличие пригородных, пассажирских и высокоскоростных поездов, а на Буловском направлении большое количество грузовых поездов.

Вследствие наличия межгосударственного стыка актуальной является задача возврата пассажирских поездов в график в случае опоздания. Довольно часто возникают ситуации задержки поездов «Аллегро» и «Лев Толстой» в Финляндии. В этом случае диспетчеру необходимо перестраивать весь план пропуска, сдвигать времена проведения плановых окон, чтобы сократить отставания поездов от графика.

Направление Санкт-Петербург — Невель — многопутная линия в пригородной зоне СПб, однопутный участок от станции Новинка. Длина полигона 604 км, 48 станций. На участке есть пассажирская и сортировочная внеклассные станции.

Движением на направлении управляют 2 поездных диспетчера и старший диспетчер направления. Размеры движения на направлении по участкам: 15/14 пар пассажирских поездов, 51/2 пары пригородных поездов, 12/11 пар грузовых поездов.

Текущее состояние автоматизации на полигонах Санкт-Петербург — Буловская, Санкт-Петербург — Невель отличается от полигона Санкт-Петербург-Москва [4]. У диспетчеров на направлении Санкт-Петербург — Буловская отсутствует табло коллективного пользования, диспетчера работают в отдельных кабинетах, а не в едином диспетчерском центре. На ответвлениях полигона Санкт-Петербург — Буловская и ряде станций полигона Санкт-Петербург — Невель отсутствует система диспетчерской централизации «Сетунь», информация о поездном положении есть только по операциям прибытия и отправления. Также, по поездкам, в том числе «Аллегро», отсутствует спутниковая информация об их дислокации и скорости. Задачи, решаемые подсистемой оперативного управления ИСУЖТ на полигонах Октябрьской дороги, приведены на рис.2.

Подробнее рассмотрим функции системы для диспетчерского управления движением поездов на примере ИСУЖТ для полигона Санкт-Петербург — Буловская.

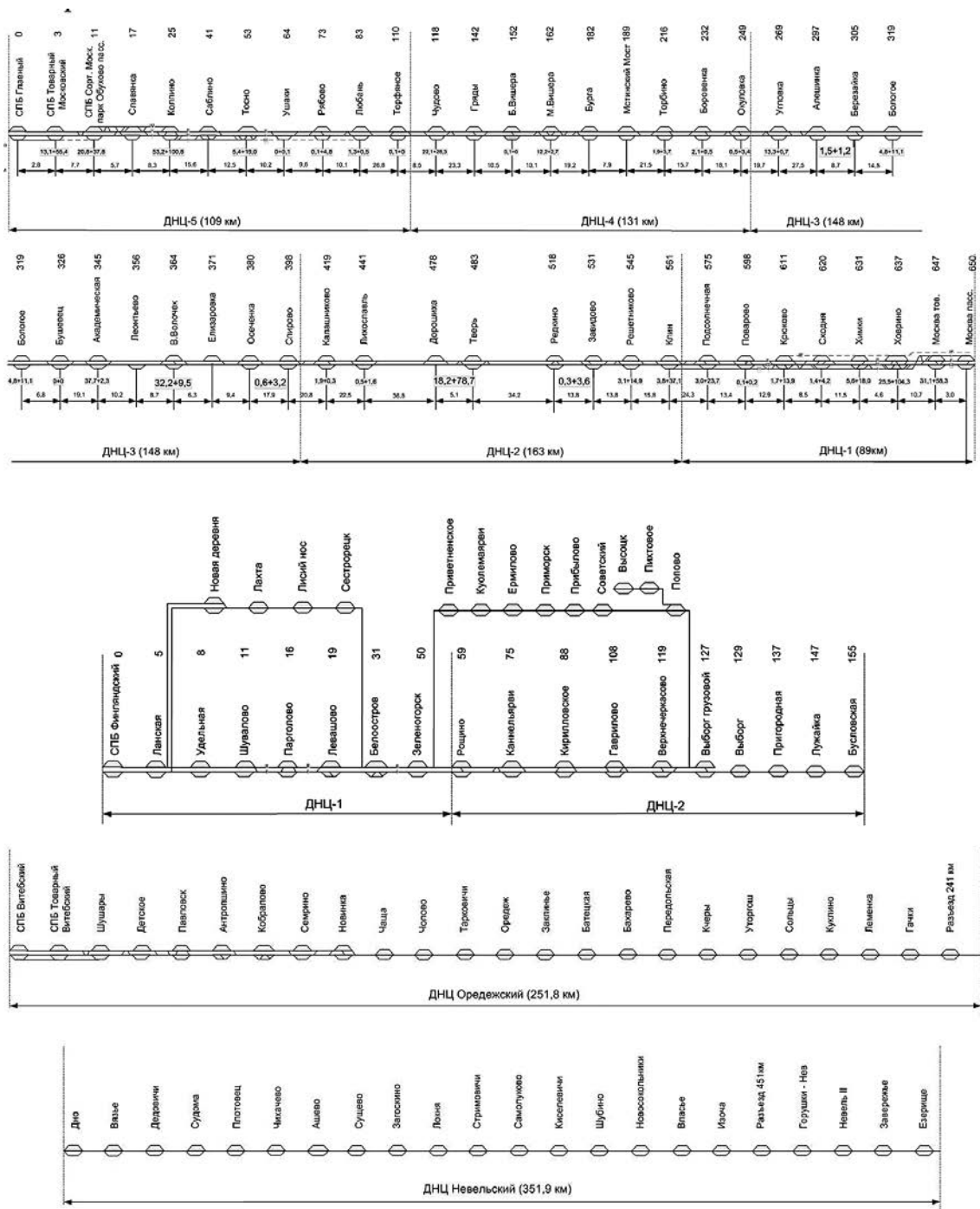


Рис.1. Полигоны Октябрьской дороги

Во-первых, это контроль. В настоящее время поездной диспетчер может контролировать движения поезда только по станциям, фиксируя события прибытия и отправления. Развитие системы диспетчерского контроля на рассматриваемом направлении позволяет контролировать и занятие всех блок-участков на перегоне. Устройствами спутниковой навигации оборудованы не все поезда, поэтому информация о скорости есть не по всем поездам. Следовательно, своевременно отследить остановку поезда на перегоне диспетчер все

же не в силах. Контроль длительности занятия блок-участков позволит своевременно оповестить диспетчера о возможной остановке поезда на перегоне.

Следующий блок предназначен для контроля течения технологических процессов. Он будет сопровождать действия диспетчера, как в штатных, так и нештатных ситуациях. Функциональный блок будет предоставлять диспетчеру выбор действий в соответствии с текущими условиями и контролировать их исполнение. В случае опоздания поездов, например,

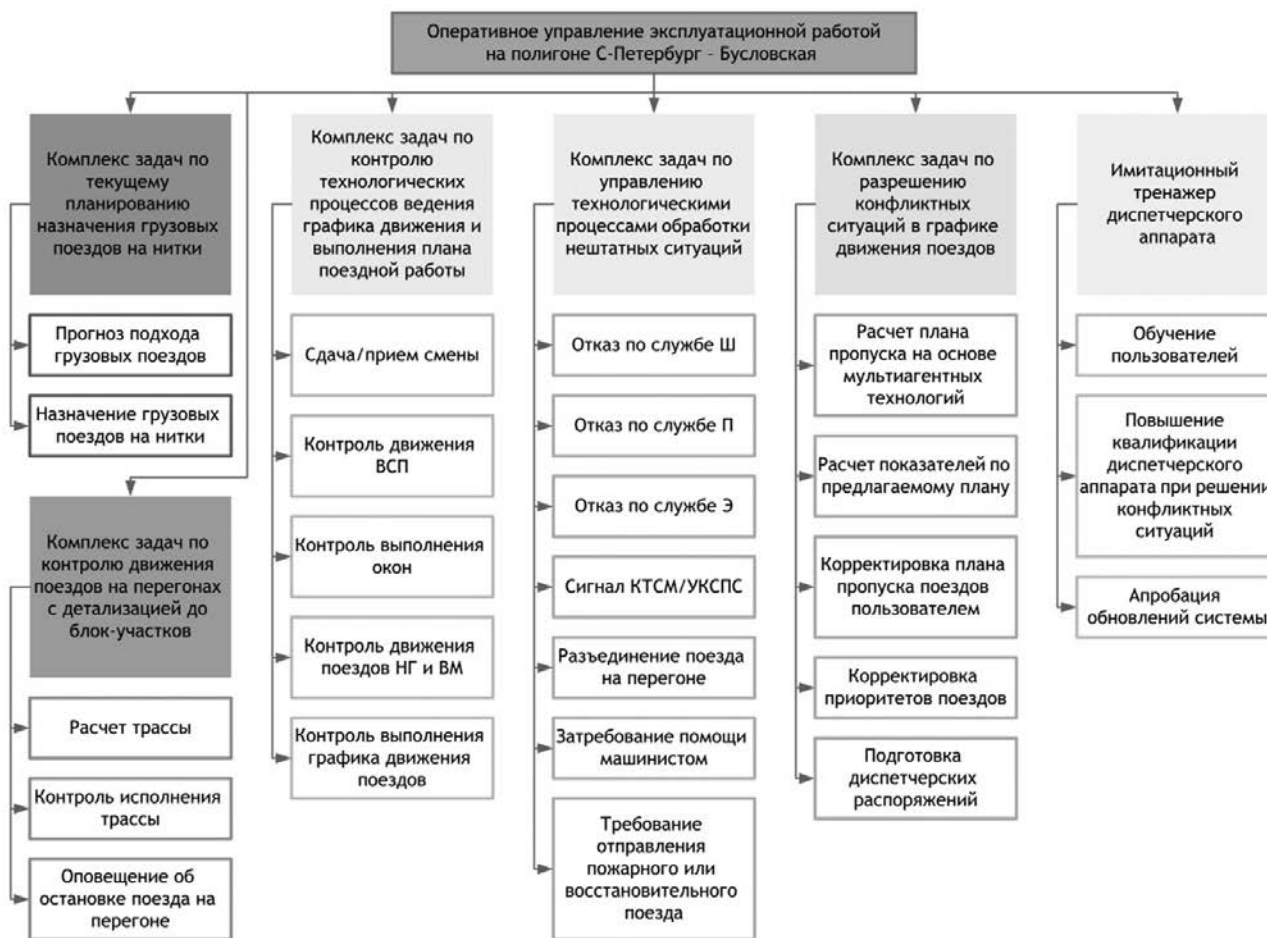


Рис.2. Комплексы задач, решаемые ИСУЖТ на Октябрьской дороге

вследствие какого-либо отказа, техпроцесс будет подсказывать диспетчеру запустить планировщик для построения плана пропуска после сбора всех необходимых данных по отказу.

Наконец, интеллектуальная составляющая системы заключается в построении плана пропуска поездов на основе мультиагентных технологий.

Полигон имеет несколько ответвлений, контролируемых другими диспетчерами, с которых могут поступать грузовые поезда (как в соответствии с нормативным графиком, так и диспетчерским расписанием). Поездным диспетчерам необходимо построить план пропуска этих грузовых подходов так, чтобы соблюсти все требования безопасности движения, местные условия пропуска, не нарушить движение пассажирских и пригородных поездов, не сорвать срок доставки груза. Кроме того, необходимо спланировать пропуск поездов своего формирования (на участке есть сортировочная станция Выборг).

Комплексы задач по текущему планированию и разрешению конфликтных ситуаций в автоматизированном режиме планируют пропуск поездов с учетом текущего

поездного положения (отклонения от графика пассажирских поездов, движение грузовых поездов диспетчерским расписанием), инфраструктурных ограничений (плановые окна, ограничения скорости, путевое развитие станций, занятость путей станции) и местных условий пропуска (приоритеты поездов, длины поездов и др.)

Новизна предлагаемого решения ИСУЖТ для полигонов Санкт-Петербург — Москва, Санкт-Петербург — Бусловская, Санкт-Петербург — Невель состоит в реализации следующих функций:

- назначение грузовых поездов на нитки графика, построение плана пропуска грузовых поездов;
- контроль движения и построение графика исполненного движения с точностью до блок-участка;
- мониторинг выполнения штатных технологических процессов;
- решение конфликтных ситуаций в реальном режиме времени с точностью до блок-участка;
- управление технологическими процессами обработки нештатных ситуаций.

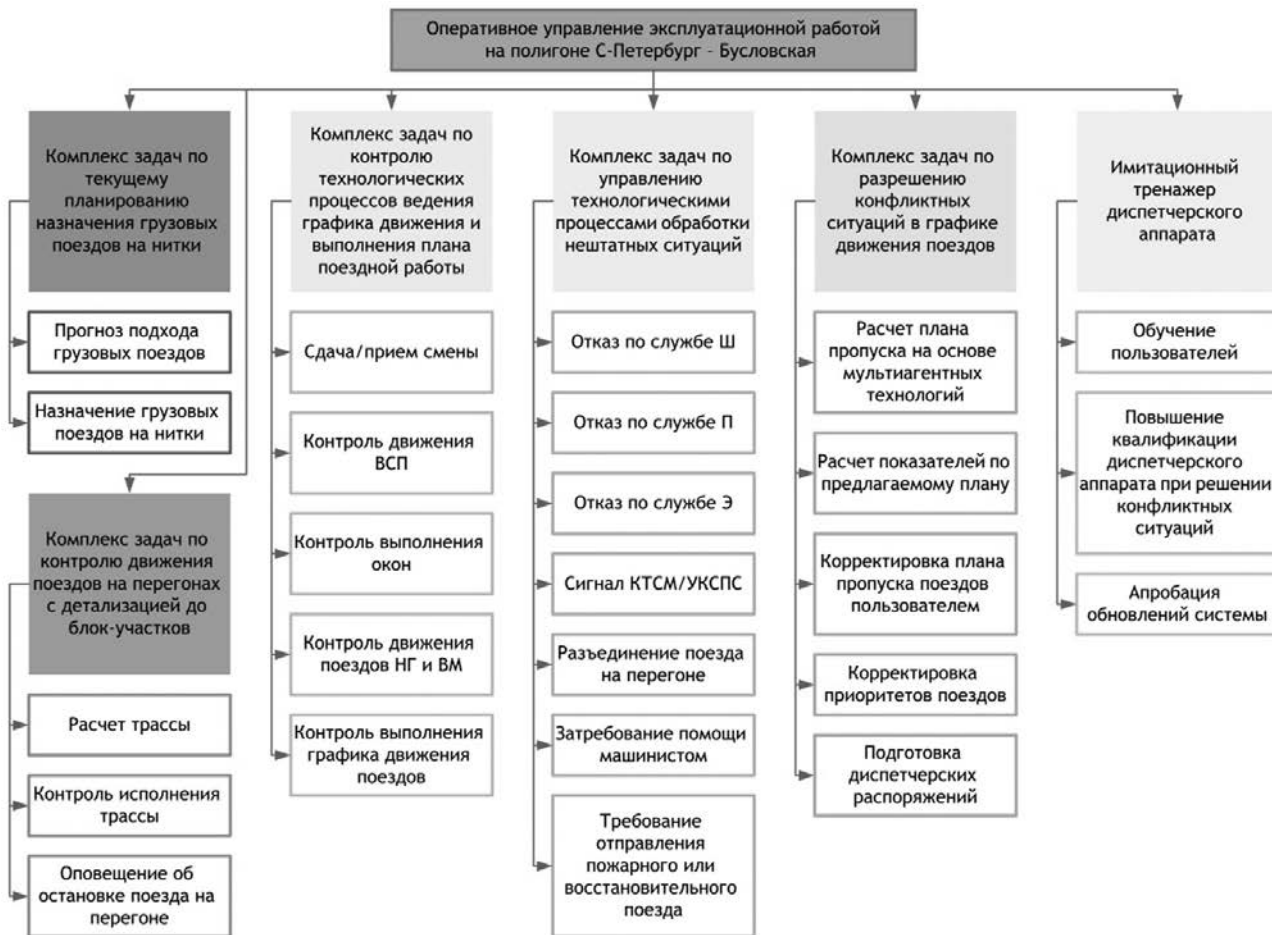


Рис.3. Взаимодействие ИСУЖТ с диспетчером

На основе данных из внешних систем по командам диспетчера в реальном масштабе времени строится план пропуска поездов. Построенный план вместе с его оценкой предлагается диспетчеру на утверждение. Диспетчер может откорректировать план пропуска, если, например, он знает об особенностях поездов, которых нет в автоматизированных системах. Например, может повысить приоритет любому поезду или группе поездов. После корректировок пользователя план пропуска ещё раз пересчитывается для исключения возможных конфликтов, которые пользователь мог не учесть. Затем план пропуска диспетчером утверждается и запускается задача контроля движения поездов. При возникновении отклонений, изменении времен подхода поездов план пересчитывается.

На полигоне Санкт-Петербург — Буловская расчет плана пропуска на 6 часов вперед занимает порядка 20 секунд.

Уже проверена работоспособность и масштабируемость алгоритмов на трех полигонах Октябрьской дороги и ведется сбор данных для настройки алгоритма планирования пропуска на Восточно-Сибирской дороге.

При переходе на новые полигоны наиболее трудоемкой является задача обработки и подготовки данных для построения плана пропуска. План строится с точностью до блок-участка, что делает систему чувствительной к точности данных системы диспетчерской централизации.

Создание системы для пилотных полигонов Санкт-Петербург — Москва, Санкт-Петербург — Буловская позволит повысить эффективность управления ресурсами железнодорожного транспорта в реальном времени и обеспечит управление движением поездов по расписанию (своевременное включение маршрутов и режимов на станциях проследования поездов) при возникновении нештатных ситуаций.

Поддержка диспетчерских решений для устранения отклонений в движении поездов от графика будет осуществляться в полнофункциональных рабочих местах, автоматизирующих сквозной процесс диспетчерского управления. Диспетчер с помощью полнофункционального АРМа сможет выполнять весь перечень должностных обязанностей, включая передачу сообщений и приказов другим диспетчерам, а также управ-

ляющих воздействий непосредственно на устройства автоматики и локомотив.

Задача назначения грузовых поездов на нитки графика позволит организовать движение грузовых поездов по расписанию. Для полигона Санкт-Петербург — Бусловская данная задача критична по причине смешанного движения. Учитывая подход поездов, система назначает грузовые поезда на нитки графика, не допуская скрещения с поездами «Аллегро» при наличии сыпучего груза в поезде.

Новой задачей ИСУЖТ на участке Санкт-Петербург — Невель является интеграция с системой автоматической установки маршрутов (АУМ). Это позволит устанавливать маршруты не только в случае отсутствия отклонений при движении в полном соответствии с графиком, но и при значительных отклонениях от расписания, а также при утверждении плана пропуска поездов диспетчером при разрешении конфликтов.

Перспективами развития ИСУЖТ на полигонах Октябрьской дороги является: интеграция с автоведением для управления тягой. Дальнейшее тиражирование описанного решения на сеть железных дорог будет основой для движения всех типов поездов по расписанию.

Заключение

В настоящее время проверена применимость многоагентных технологий для возврата поездов в расписание. Архитектура разработанной системы позволяет декомпозировать задачу. Заложена масштабируемость системы: решение для полигона Санкт-Петербург-Москва с добавлением грузовых поездов адаптировано на полигоне Санкт-Петербург – Бусловская. В системе предусмотрено добавление новых данных: ограничений, технологий, правил, которые возникали в процессе эксплуатации. Разработанная система обучаемая, так как позволяет оперативно редактировать правила решения конфликтных ситуаций. В ИСУЖТ результаты разрешения конфликтов отображаются с помощью когнитивного интерфейса, что позволяет диспетчеру быстро оценить предложенное решение и предпринять необходимые действия.

Разработанная управляющая система введена в опытную эксплуатацию в ноябре 2013г на полигонах Санкт-Петербург-Москва, Санкт-Петербург – Бусловская, в процессе которой произведена более точная настройка параметров алгоритма разрешения конфликтов на основе многоагентных технологий, добавлено множество дополнительных ограничений и правил, которые были определены самими пользователями системы.

Литература

1. Матюхин В.Г., Шаров В.А., Шабунин А.Б. Управление железной дорогой онлайн/ Пульс управления, 2011. № 03. – С.24-29
2. Матюхин В.Г., Шабунин А.Б., Калущая А.П. Дороги проверяют / Пульс управления, 2012. № 05(09). – С.24-27.
3. Матюхин В.Г., Шабунин А.Б. ИСУЖТ. Концепция и реализация // Сборник трудов Первой научно-технической конференции «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте» (ИСУЖТ-2012, Москва, 15-16 ноября 2012г). – М. – Изд-во ОАО «НИИАС», 2012. – С. 15-18.
4. Ефремов Г.А., Калущая А.П. Интеллектуальное диспетчерское управление движением поездов на направлении Санкт-Петербург - Москва// Сборник трудов Первой научно-технической конференции «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте» (ИСУЖТ-2012, Москва, 15-16 ноября 2012г). – М. – Изд-во ОАО «НИИАС», 2012. – С. 55-57.
5. Матюхин В.Г., Шабунин А.Б., Калущая А.П. От продуманного решения к качественной реализации / Железнодорожный транспорт, 2013. №3. – С.20-22.
6. Шабунин А.Б., Ефремов Г.А., Калущая А.П. Использование мультиагентных систем в диспетчерском регулировании / Железнодорожный транспорт, 2013. №3. – С.23-27.
7. Шабунин А.Б., Чехов А.В., Ефремов Г.А., Дмитриев Д.В., Курбатов Е.В., Сазуров С.В., Бабанин И.О., Белоусов А.А., Кожевников С.С., Симонова Е.В., Скобелев П.О., Степанов М.Е., Царев А.В., Мунтян Г.Ю. Решение конфликтов в графике движения поездов в реальном времени с использованием мультиагентных технологий// Сборник трудов Первой научно-технической конференции «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте» (ИСУЖТ-2012, Москва, 15-16 ноября 2012г). – М. – Изд-во ОАО «НИИАС», 2012. – С. 51-54.
8. Ефремов Г.А., Ефремова А.П., Курбатов Е.В. Диспетчерское управление движением поездов на основе интеллектуальных многоагентных систем // Сборник трудов Второй научно-технической конференции «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте» (ИСУЖТ-2013, Москва, 15-16 октября 2013г). – М. – Изд-во ОАО «НИИАС», 2013. – С. 55-57.

Рябых Н.Г., ООО «ПрограмПарк», г. Москва

Захарова Е.М., Минашина И.К., Корчагин Т.А., МФТИ, г. Москва

Реализация привязки поездов на нитки вариантного графика с помощью решения задачи о назначениях

Вступление

Задача планирования расписания грузоперевозок является одной из наиболее сложных и актуальных задач, возникающих в рамках управления движением на железнодорожном транспорте. В задачу планирования расписания грузоперевозок можно включить задачу составления расписания движения поездов (а именно, выбор оптимального времени отправления поездов со станций), а также задачу привязки к поездам локомотивов и локомотивных бригад. При этом, хотя и эти задачи требуется решать в комплексе, задача составления расписания движения поездов является базовой, на которую впоследствии накладываются ограничения задач о прикреплении тяговых ресурсов.

В статье будет рассказано об одной из задач проекта, запланированного в рамках гранта РФФИ по конкурсу ориентированных фундаментальных исследований по актуальным междисциплинарным темам в интересах ОАО «РЖД». В данной работе будет описан способ составления расписания движения грузовых поездов, а именно привязка поездов на нитки вариантного графика движения с помощью сведения данной задачи к задаче о назначениях и решения ее методом аукционов.

Постановка задачи

Главное ограничение в задаче составления расписания движения поездов заключается в том, что для поездов нельзя выбирать произвольные времена отправления и прибытия на станции. Поезда, в соответствии с технологией, должны двигаться только по определенным ниткам вариантного графика, который составляется на основе нормативного графика движения поездов на каждые следующие железнодорожные сутки. Поэтому задачу составления расписания можно поставить как задачу поиска оптимальных ниток вариантного графика для поездов.

Формально задачу можно сформулировать следующим образом. На вход модуля планирования подаются следующие данные:

- Исходное расположение поездов на полигоне на начало планирования;
- Сформированные и готовые к отправлению поезда, находящиеся на станциях;
- План составообразования поездов на ближайшие сутки с указанием станции формирования и приблизительного времени завершения формирования каждого поезда;
- Вариантный график движения: набор ниток, на которые можно прикреплять поезда.
Для каждого поезда известно его текущее местоположение и маршрут до станции назначения. Задача заключается в том, чтобы оптимальным образом выбрать нитки вариантного графика, на которые требуется прикрепить поезд. При этом поезд необязательно должен занимать всю нитку целиком. Возможны случаи, когда по одной нитке движутся два или более поездов (на разных участках), а также случаи, когда один поезд следует по нескольким ниткам последовательно на разных участках.

Сведение к задаче о назначениях

Задача о назначениях – это стандартная математическая задача, она является типичным примером задачи комбинаторной оптимизации. В общей форме эту задачу можно сформулировать следующим образом:

- Имеется некоторое число работ (N) и некоторое число исполнителей (M) этих работ. Каждый исполнитель умеет выполнять некоторое количество P из этих работ ($0 \leq P \leq N$), причем эффективность выполнения «своих» работ у исполнителя разная: некоторые работы он умеет выполнять лучше, некоторые – хуже. Требуется распределить работы между исполнителями так, чтобы суммарная эффективность назначения была максимальной.

Для каждой пары <работа, исполнитель> вводится «функция полезности» U_{ij} – числовое выражение эффективности назначения данного исполнителя на данную работу. Таким образом, оптимизация в рамках данной задачи сводится к максимизации функции $\sum U_{ij}$ по всем назначениям исполнителей на работы при условии, что каждый исполнитель назначен не более чем на одну работу.

Рассмотрим, как свести задачу привязки поездов на нитки графика к задаче о назначениях:

- В качестве «исполнителей» будем считать поезда, которые требуется прикрепить к ниткам. Тогда главным требованием задачи о назначениях будет обеспечение работами всех исполнителей (что будет эквивалентно назначению всех поездов на нитки графика).
- В качестве «работ» возьмем нитки вариантного графика. Тогда условие, что «каждый исполнитель может выполнять некоторое количество ра-

бот» соответствует тому, что для каждого поезда имеется выбор, к какой нитке оказаться прикрепленным. При этом для некоторых пар <поезд, нитка> прикрепление вообще невозможно: это, например, происходит для случаев, когда маршрут поезда не имеет совпадений с маршрутом нитки.

Поскольку каждый поезд может быть назначен на разные нитки на разных фрагментах маршрута, то для решения общей задачи о прикреплении поездов на нитки будем решать последовательность задач о назначениях:

- Каждая задача о назначениях будет ставиться для отправления поездов с одной станции.
- Для каждой станции определим набор поездов, которые на данной итерации требуется запланировать к отправлению с данной станции. На первом шаге это поезда, которые находятся на данной станции на начало планирования, а также те, которые уже были запланированы к отправлению и текущая станция является следующей необработанной станцией их маршрута.
- После того как мы выполнили привязку поездов на одной станции (решили задачу о назначениях), мы знаем время, в которое каждый поезд прибывает на следующую станцию своего маршрута. На следующей итерации каждый привязанный поезд попадет в множество поездов «которые уже были запланированы к отправлению» (см. предыдущий пункт) в задаче о назначениях на следующей станции их маршрута.
- Таким образом, перед каждой итерацией мы можем вычислить количество поездов, которые требуется привязать на нитки вариантного графика на каждой станции планирования. Тогда в качестве обрабатываемой на данном шаге станции будем выбирать станцию, на которой это количество поездов максимально. Последовательно проходя все станции, мы выполним привязку всех поездов на всем протяжении их маршрутов.

Вычисление функции полезности

Ключевым вопросом для формулировки задачи привязки поездов на нитки как задачи о назначениях является правило вычисления функции полезности для каждой пары <поезд, нитка>. Вычисление функции полезности будем вести следующим образом. Сначала определим критерии, которые определяют эффективность назначения поезда на нитку. Таким критериями являются:

1. Время ожидания поезда. Поскольку долгий простой поездов на станциях нецелесообразен, время стоянки поезда на станции в ожидании следующей нитки должно быть, по возможности, маленьким.

Для этого критерия есть несколько нюансов использования:

- a. На станции формирования поезда этот критерий требуется учитывать с меньшим весом, исходя из того, что на станции формирования поезд может простаивать в ожидании отправления дольше, чем на промежуточных станциях по ходу движения.
 - b. Для станций смены бригад и локомотивов должно учитываться время на стоянку поезда для соответствующей смены.
2. Равномерность почасового отправления поездов:
 - a. Количество поездов, запланированных к отправлению в данный час, должно быть близко к среднему количеству поездов, которое надо отправить в час с этой станции. Среднее количество можно найти, взяв объемный суточный план отправления поездов и разделив количество поездов из этого плана на 24.
 - b. Требуется оставлять «свободные пропускные способности» на случай внепланового отправления поездов. Например, если в какой-то час со станции проложено 5 свободных ниток вариантного графика, а в другой час – только 2 нитки, то скорее надо назначать поезда на отправление в первый час, а не во второй.
 3. Процент совпадения маршрута поезда и нитки. Поезда надо по возможности привязывать к тем ниткам, маршрут которых полностью совпадает с маршрутом поезда. Тогда при назначении поезда не останется лишних «хвостов» ни от маршрута поезда, ни от нитки.
 4. Сохранение предыдущей подвязки поезда. Если поезд уже прикреплен на нитку на предыдущем участке, то надо стремиться сохранить текущую нитку. Каждому критерию ставится в соответствие нормированное численное значение u_k , а затем вычисляется значение функции полезности для пары <поезд, нитка> как

$$U_{ij} = \sum_k c_k u_k,$$

где c_k – вес соответствующего k -го критерия. Веса подбираются экспериментальным образом в ходе настройки системы и могут быть указаны отдельно для разных участков полигона.

Заметим, что функции полезности имеет смысл вычислять только для тех ниток, для которых назначение поезда хотя бы теоретически возможно. Для остальных ниток значение функции полезности задаваться не должно. В множество невозможных ниток могут, например, попадать нитки, не имеющие пересечений с маршрутом поезда, или нитки с категорией, не входящей под категорию поезда. Набор условий для та-

кого отсева ниток может задаваться отдельно для каждого фрагмента полигона.

Алгоритм решения задачи о назначениях с помощью аукционов

Задача о назначениях является частным случаем транспортной задачи, а она, в свою очередь, является частным случаем задачи линейного программирования. Эти задачи можно решать стандартным симплекс-методом, однако лучше использовать специализированные алгоритмы.

Самым распространенным алгоритмом решения задачи о назначениях является «венгерский алгоритм». Этот алгоритм был предложен в 1955 году и имеет вычислительную сложность $O(n^4)$, где n – количество работ и исполнителей (при условии, что эти количества одинаковые). Этот алгоритм можно модифицировать так, чтобы достичь времени выполнения $O(n^3)$. Данный алгоритм был реализован для решения исследуемой задачи о назначении поездов на нитки графика, но его производительность оказалась неприемлемой. Поэтому был найден другой алгоритм – решение задачи о назначениях с помощью аукционов.

Впервые метод решения задачи о назначениях с помощью аукционов был предложен Д. Бертсекасом в статье 1989 года [2] и был доработан им же и Д. Кастаном в 1992 году [3]. Алгоритм изначально предназначен для асимметричной задачи о назначениях, когда количество работ и количество исполнителей не совпадают. Основные идеи алгоритма заключаются в следующем:

1. Для каждой работы (в данном случае – для нитки) вводится понятие «цены» p_j . Это значение показывает дополнительную «стоимость», которую исполнитель (поезд) должен «заплатить», чтобы оказаться назначенным на данную работу. В начале алгоритма все нитки имеют нулевую цену.
2. На первом шаге берется произвольный поезд и назначается на нитку с максимальной функцией полезности. На этом же шаге происходит изменение цены данной «наилучшей» нитки следующим образом. Выбирается «вторая по полезности» нитка – это нитка, значение функции полезности (по данному поезду) для которой максимальное среди всех остальных, неприкрепленных ниток. В качестве цены «наилучшей» нитки устанавливается разность между «максимальным» и «вторым» значением функции полезности.
3. Смысл такой установки цены следующий. Допустим, для какого-то другого поезда максимальной функцией полезности также оказалась функция, вычисленная для этой, уже занятой нитки. Тогда, чтобы назначить новый поезд на эту нитку, предыдущий поезд требуется переназначить на другую

нитку – вторую по полезности. Но тогда суммарная полезность всего назначения понизится как раз на разность между максимальным и вторым значением функции полезности для первого поезда. Таким образом, чтобы суммарная функция полезности не стала меньше, от второго поезда требуется, чтобы это максимальное значение функции полезности для второго поезда превышало «второе» значение функции полезности второго поезда не менее чем на цену уже занятой нитки.

4. Таким образом, можно сказать, что поезда начинают «торговаться» за нитки, предлагая фиксированные суммы, но цены на нитки постоянно изменяются.

Итого, шаги алгоритма можно описать следующим образом:

1. Для неприкрепленного поезда i выбирается наилучшая нитка j :

$$j_i = \arg \max_{j \in A(i)} \{U_{ij} - p_j\},$$

где p_j – цена нитки j , $A(i)$ – множество ниток, допустимых для поезда i .

2. Вычисляется второе по величине значение «выгоды» от назначения поезда на нитку j_i :

$$w_i = \max_{j \in A(i), j \neq j_i} \{U_{ij} - p_j\}.$$

Если других возможных назначений поезда, кроме нитки j_i , нет, то w_i принимается равным $-\infty$.

3. Далее вычисляется новая цена для нитки j : $p_j = \max\{\lambda; U_{j_i} - w_i + \varepsilon\}$, где λ – пороговое значение (константа), ниже которого цену устанавливать запрещается, ε – малая величина порядка $1/N$.
4. Если $\lambda \leq U_{j_i} - w_i + \varepsilon$, то поезд i назначается на нитку j , а предыдущее назначение на нитку j сбрасывается (поезд i' , который ранее был назначен на нитку j , удаляется из множества прикрепленных поездов).
5. Шаги 1–4 повторяются до тех пор, пока все поезда не окажутся назначенными на нитки. В том случае, если количество ниток меньше количества поездов, алгоритм на каком-то шаге достигнет оптимального распределения поездов и набор назначенных поездов не будет далее изменяться. В этом случае также требуется остановить работу алгоритма.

Строгое доказательство сходимости данного алгоритма, а также обоснование выбора значений величин λ и ε приведено в статье [3].

Результаты и пути улучшения работы алгоритма

Для сравнения производительности решения задачи о назначениях с помощью венгерского алгоритма и алгоритма аукционов эти алгоритмы были реализованы на языке программирования *AgentSpeak*. Тестирование на модельных примерах показало, что уже на задачах размерности около 200×200 алгоритм аукционов показывает существенный прирост в скорости сходи-

мости по сравнению с венгерским алгоритмом: 20 секунд вместо 3–4 минут (данные временные показатели не стоит оценивать в абсолютном значении, поскольку *AgentSpeak* сам по себе довольно «медленный» язык). Оценка показывает, что алгоритм аукционов сходится за время около $N\log(N)$ и существенно выигрывает в производительности у венгерского алгоритма.

Далее алгоритм аукционов был реализован на языке *Java* в модуле планирования системы ИСУЖТ ВП1, который осуществляет привязку поездов на нитки графика на Восточном полигоне. Планирование производилось на 350 выделенных станциях, маршруты поездов включали в себя от 5 (поезда, заканчивающие свое следование) до 100 станций (поезда, следующие почти через весь полигон), общее количество поездов для привязки на нитки – около 2000. Общее время работы модуля привязки поездов на нитки составляет около 3 минут, что является приемлемым временем работы.

Возможные пути улучшения алгоритма заключаются в следующем:

- Помимо процедуры, описанной в предыдущем разделе, Бертсекас и Кастанон вводят процедуру «обратного» аукциона, когда не поезд подбирают нитки под себя, а наоборот – свободные нитки графика подбирают поезда, которые следует назначить «на себя». В этой процедуре также производится переопределение значения «пороговой» цены λ : пороговая цена теперь может меняться на каждом шаге. Общий алгоритм включает в себя как «прямую», так и «обратную» процедуру аукциона. Согласно исследованиям Бертсекаса и Кастанона, использование такого комбинированного аукциона в некоторых случаях может на порядок сократить время решения задачи о назначениях.

- В работе М. Завланоса, Л. Спесивцева и Г. Паппаса [4] приводится способ распределенного мультиагентного решения задачи о назначениях с помощью аукционов. В этом варианте аукциона каждый поезд представляется в виде агента. Процедура аукциона, описанная в предыдущем разделе, сохраняется (с некоторыми изменениями) для одного агента, но с помощью правильно организованного обмена знаниями между агентами удается также добиться прироста производительности. Текущая реализация алгоритма в системе ИСУЖТ ВП1 также является мультиагентной, но в качестве агентов фигурируют только агенты станций, которые хранят данные об уже запланированных поездах и управляют последовательностью, в которой решаются задачи о назначениях.

Литература

1. Таха, Хемди А., Введение в исследование операций, 7-е издание.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2005: гл 5.4 Задача о назначениях.
2. Bertsekas, D. P. (1988). The auction algorithm: A distributed relaxation method for the assignment problem. *Annals of Operations Research*, 14(1), 105–123.
3. Bertsekas, D., & Castanon, D. (1992). A forward/reverse auction algorithm for asymmetric assignment problems. *Computational Optimization and Applications*, 1(3), 277–297.
4. Zavlanos, M. M., Spesivtsev, L., & Pappas, G. J. (2008). A Distributed Auction Algorithm for the Assignment Problem. In *Decision and Control, 2008. CDC 2008. 47th IEEE Conference on* (pp. 1212–1217).

Хавторин А.М., ОАО «НИИАС», г. Москва

Учет загрузки инфраструктуры для принятия решения о согласовании уведомлений о предъявлении порожних вагонов для перевозки

Одной из комплексных задач, решаемых при создании функциональной подсистемы УФТО ИСУЖТ, является задача «Учет загрузки инфраструктуры для принятия решения о согласовании уведомлений о предъявлении порожних вагонов для перевозки».

На сегодняшний день вагонный парк российских операторов грузоперевозок составляет более 1.2 млн вагонов, и количество вагонов растет на 5-7%, опережая рост объема перевозок, из-за чего на сегодняшний день профицит вагонного парка составляет 25-30%.

Ежегодно вагонная база растет на 5-7%, опережая рост объема перевозок, из-за чего на сегодняшний день профицит вагонного парка составляет 25-30%. Действуя в условиях высококонкурентной среды, операторы стремятся создать «запас» порожних вагонов в тех узлах сети, где прогнозируется получение выгодных заказов на перевозку грузов. Другой распространенный сценарий – курсирование порожних вагонов «в режиме такси», обслуживая возникающие по ходу небольшие заказы.

Для РЖД перегон даже пустых вагонов является прибыльным, но эта прибыль значительно ниже той, которая может быть получена от перевозки грузов.

Таким образом, операторы и непосредственно РЖД сталкиваются со следующими проблемами:

- Возникновение переизбытка порожнего вагонного состава на станциях и перегонах, приводящего к затрам
- Перевозка избыточного количество порожних вагонов, не предназначенных под погрузку конкретного груза
- Срыв нормативных сроков доставки грузов
- Увеличение нагрузки на существующую инфраструктуру
- Снижение прибыльности грузоперевозок.

В итоге, ЦФТО как подразделение РЖД, ответственное за получение прибыли от грузоперевозок, сталкивается с необходимостью увеличивать объем продаж и прибыль при все возрастающем количестве помех.

Одним из способов решения перечисленных выше проблем может стать создание механизма ограничения отправки порожнего состава, перегружающего инфраструктуру станции погрузки. Результатом станет минимизация непродуктивного трафика порожних вагонов. Действующее федеральное законода-

тельство и внутренние регламенты РЖД декларируют равную доступность инфраструктуры для всех участников и дают крайне ограниченные возможности для ограничения отправок. Немотивированные же отказы в отправке порожнего состава могут повлечь за собой судебные иски и штрафные санкции. Аналогично, к штрафным санкциям приводит и срыв сроков доставки грузов.

Комплексная задача «Учет загрузки инфраструктуры для принятия решения о согласовании уведомлений о предъявлении порожних вагонов для перевозки» реализована на основе «Технологии расчёта прогнозной занятости перерабатывающих мощностей грузоотправителя на основе взаимодействия с системой ЭТРАН для обеспечения логического контроля за технологическими парками полигона дороги» от 2013 года, утверждённой вице-президентом ОАО «РЖД» С.М. Бабаевым.

При решении задачи обеспечивается подвод и подача под погрузку порожних вагонов в количестве, не превышающем реальные перерабатывающие способности грузоотправителя, в соответствии с положениями приказа Минтранс РФ №258, с одновременным выполнением следующих условий:

- Соблюдение основных положений Целевой модели рынка и основных направления развития структуры ОАО «РЖД»;
- Соблюдение принципов равнодоступности услуг инфраструктуры для всех участников рынка перевозок, перевозчиков и организаций, обслуживающих инфраструктуру железных дорог;
- Выполнение комплексной совместной технологии работы грузоотправителя и станции по организации подвода подвижного состава под погрузку с учётом данных заявок с указанием собственников подвижного состава, для минимизации маневровой работы и непроизводительных простоев подвижного состава, как на путях станции, так и на путях клиента.

Ожидаемые результаты от решения задачи:

- Снижение нагрузки на инфраструктуру.
- Снижение расходов ОАО «РЖД» на выплаты по претензиям.
- Минимизация непроизводительного простоя порожних вагонов.
- Минимизация непроизводительного трафика.

Реализация комплексной задачи.

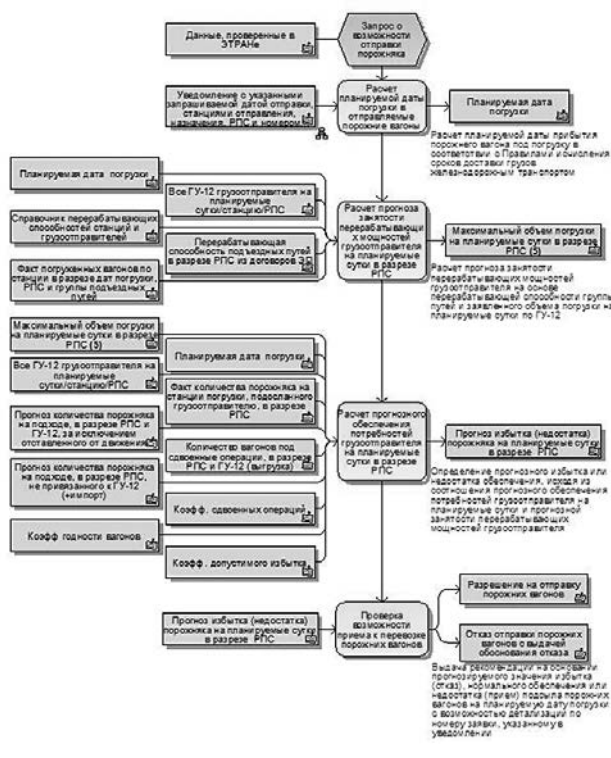


Рис. 1 Алгоритм принятия решения

Норма переработки для конкретного подъездного пути берется из данных договора на эксплуатацию данного подъездного пути или из договора на подачу и уборку вагонов. В случае отсутствия такого параметра в договоре допускается использование данных НСИ перерабатывающих способностей станций и грузоотправителей режима «Инфраструктурные ограничения» АС ЭТРАН.

Все подъездные пути, принадлежащие грузоотправителю, группируются в соответствии с их специализацией по родам подвижного состава.

Нормы переработки для каждой из таких групп суммируются.

Порядок расчета следующий:

1. Для расчёта максимального объёма погрузки грузоотправителя на планируемые сутки берётся минимум из суммы норм переработки группы путей по РПС и максимального объёма погрузки на планируемые сутки (берётся как разница между количеством вагонов, запланированных к погрузке, и количеством погруженных вагонов)
2. Для расчета прогнозного обеспечения планируемых суток для каждой группы заявок подсчитывается общее количество вагонов, находящихся в порожнем состоянии на станции погрузки, и подосланных под заявки этой группы, либо следующие данному грузоотправителю в порожнем

состоянии из-за границы через сухопутные погранпереходы (возврат из-под импорта), либо следующих в грузе состоянии в адрес грузоотправителя (двойные операции).

Коротко о функциональной системе УФТО ИСУЖТ

Подсистема УФТО реализуется как открытая система и допускает наращивание функциональных возможностей.

Подсистема УФТО будет обеспечивать возможность модернизации как путём замены технического и общего программного обеспечения (ПО), так и путём совершенствования информационного обеспечения.

Коротко об ИСУЖТ

Один из ключевых принципов ИСУЖТ – объединение информации, технологических процессов и алгоритмов поддержки принятия решений в составе комплексных автоматизированных рабочих мест (АРМ).

Комплексные АРМ-ы должны заменить многообразие информационных систем, установленных на рабочих местах работников различных подразделений/филиалов ОАО «РЖД», сфокусировать их внимание на релевантной для данных работников информации, обеспечить возможность ее анализа, принятия решений и контроля над их исполнением в единой системе.

Основой комплексных АРМ ИСУЖТ являются:

- Единое информационное пространство системы, обеспечивающее полную ситуационную осведомленность;
- Тесная интеграция с действующими информационными системами и источниками данных;
- Алгоритмы поддержки принятия решений на базе технологии интеллектуальных агентов.

Технологии и результаты

Функциональная подсистема УФТО содержит программную реализацию алгоритма «Прогнозирование возможности отправки порожнего вагонного состава в соответствии с поданными уведомлениями», которая реализована на программной платформе Вектор-М, которая предоставляет современные технологии и средства разработки, такие как JRuby 1.7.4 и Java 7.25.

Программная платформа Вектор позволяет создавать и исполнять приложения самого широкого назначения, начиная с автоматизации работы диспетчерских служб, задействованных в различных технологических и производственных процессах, комплексных систем безопасности и мониторинга и паспортизации объектов.

В качестве основной базы данных для реализации комплексной задачи «Учет загрузки инфраструктуры для принятия решения о согласовании уведомлений о предъявлении порожних вагонов для перевозки» используется объектно-реляционная система управления базами данных компании Oracle - Oracle 11g.

Кан Ю.С., Кибзун А.И., Иванов С.В., МАИ, г. Москва

Оптимизационная модель назначения локомотивов для перевозки грузовых составов

Введение

Как отмечается в [1], в настоящее время значительное внимание уделяется повышению эффективности использования энергоресурсов на железнодорожном транспорте. При этом значительные потери энергоресурсов связаны с неэффективностью организации грузовых перевозок. В связи с этим возникает задача поиска стратегии эффективного назначения локомотивов для перевозки составов. В настоящей работе предлагается оптимизационная модель назначения локомотивов для перевозки грузовых составов на некотором участке железнодорожной сети. Предполагается, что составы на станциях формируются случайным образом.

Математическая постановка задачи

Пусть имеется S станций с номерами $s=1, \dots, S$ и J локомотивов с номерами $j=1, \dots, J$. Станции с номерами $1, \dots, D$ ($D < S$) являются также депо, в которых располагаются локомотивы.

Пусть распределение локомотивов по станциям необходимо производить в дискретные моменты времени $t=0, 1, 2, \dots, T$. Единица времени соответствует, например, трём часам.

Предположим, что за каждый промежуток времени $[t; t+1)$ может появиться не более одного состава по каждому направлению, задаваемому станциями отправления и назначения. Поскольку всего станций S , за каждый промежуток времени $[t; t+1)$ может появиться не более S^2 составов, а за весь период наблюдения – не более TS^2 составов. Будем использовать следующую нумерацию составов: составу, появляющемуся в промежуток времени $[t; t+1)$ и следующему от станции с номером n до конечной станции с номером $l \neq S$ присвоим номер

$$i = (t+T)S^2 + (n-1)S + l - 1. \quad (1)$$

При введённой нумерации составов по номеру состава можно однозначно восстановить время появления, конечный и начальный пункт маршрута. В частности, время появления

$$t(i) = \left\lfloor \frac{i}{S^2} \right\rfloor - T, \quad (2)$$

конечный пункт маршрута имеет номер

$$l(i) = S \left\{ \frac{i}{S} \right\} + 1, \quad (3)$$

начальный пункт маршрута имеет номер

$$n(i) = \left\lceil \frac{i - (t(i) + T)S^2}{S} \right\rceil + 1, \quad (4)$$

где $\lfloor \cdot \rfloor$ — целая часть числа, а $\{ \cdot \}$ — дробная часть числа.

Отметим, что до момента $t=0$ могут быть образованы составы, которые уже ведутся локомотивами. Предположим, что все эти составы образуются с момента времени $t=-T$ до момента $t=0$. Присвоим этим составам номера по формуле (1), где n — начальная станция движения состава, l — конечная станция, а время меняется от $t=-T$ до $t=-1$. При такой нумерации по номеру состава также однозначно определяются по формулам (3)–(4) время отправления состава, его начальный пункт и пункт назначения.

Пусть I — множество номеров всех составов, возникающих как до момента времени $t=0$, так и номеров составов, возникших, начиная с момента $t=0$.

Введём случайные векторы $\xi_t = (\xi_t^{11}, \xi_t^{12}, \dots, \xi_t^{SS})^T$, $t=0, T-1$, с реализациями $x(t) \in \mathbb{R}^{S^2}$. Если в векторе $x(t)$ координата $x_{(n-1)S+t}(t)=1$, то в момент времени t возник состав, движущийся от станции n до станции l . Если же $x_{(n-1)S+t}(t)=0$, то состав с направлением движения от станции n до станции l не появился. Предполагается, что составы возникают независимо друг от друга, т.е. все случайные величины ξ_t^{nl} независимы. Пусть известна вероятность возникновения состава на каждой станции с заданным направлением движения $P\{\xi_t^{nl} = 1\} = p^{nl}$, которая не зависит от времени.

Опишем маршрут i -го состава с помощью функции $\eta_i(S_1, S_2)$, которая принимает значение 1, если в маршруте i -го состава станция S_1 предшествует станции S_2 , и 0 в противном случае. Предположим, что известно время движения τ^{ks} локомотива с составом от произвольной станции с номером k до произвольной станции с номером s .

Пусть масса μ_i груза, перевозимого i -м составом, является случайной и имеет нормальное распределение $N(\bar{m}_i, \sigma_i^2)$, причём все μ_i независимы. Предположим, что для каждого локомотива известна максимальная масса m_j^* состава, которую он может перевозить.

Введём переменные управления:

$$v_{ij}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если для обслуживания } i\text{-го состава в момент} \\ & \text{времени } t \text{ назначен } j\text{-й локомотив,} \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases}$$

$$u_j^{ks}(t) = \begin{cases} 1, \text{ если } j\text{-й локомотив в момент} \\ \text{времени } t \text{ отправляется от станции } k \text{ до станции } s, \\ 0, \text{ иначе.} \end{cases}$$

Заметим, что k и s – это номера станций, на которых может находиться j -й локомотив в момент времени t и $t+\tau^{ks}$ соответственно. Эти номера станций будут находиться на маршруте движения i -го состава, если j -й локомотив назначен для перевозки этого состава. Если j -й локомотив остаётся на k -й станции, то будем считать, что $u_j^{kk}(t) = 1$. Если в момент времени t j -й локомотив находится в движении, то $u_j^{ks}(t) = 0$ для всех $k, s = 1, S$.

Введём переменные состояния системы, характеризующие положение локомотивов и составов на станциях, расположенных по маршруту движения составов:

$$z_i^s(t) = \begin{cases} 1, \text{ если в момент времени } t \\ i\text{-й состав находится на станции } s \\ 0, \text{ иначе,} \end{cases}$$

$$y_j^s(t) = \begin{cases} 1, \text{ если в момент времени } t \\ j\text{-й локомотив находится на станции } s \\ 0, \text{ иначе,} \end{cases}$$

Обозначим через $c(t)$ суммарный грузопоток к моменту времени t с учётом штрафа за перегонку локомотивов без груза.

Пусть известно состояние системы в начальный момент времени $t=0$: $z_i^s(0) = z_{i0}^s$, $i \in I$, $y_j^s(0) = y_{j0}^s$, $j = 1, J$, $s = 1, S$, $c(0)=0$. Поскольку состояние системы рассматривается в момент времени $t=0$, управление системой $v_{ij}(t)$ и $u_j^{ks}(t)$ в моменты времени от $t=-T$ до $t=-1$ считается известным и его не нужно выбирать. Также считаются известными состояния системы $z_i^s(t)$ и $y_j^s(t)$ в моменты времени от $t=-T$ до $t=-1$.

Предположим, что в момент $t=0$ известна последовательность появления составов на различных станциях вплоть до момента $t=T-1$, т.е. предположим, что известна реализация $x(t)$ случайного вектора ξ_t . Это значит, что в момент $t=0$ известны номера всех составов, определяемые по формуле (1). Предположим, что масса i -го состава также известна и равна m_i , $i \in I$.

Рассмотрим динамику изменения положения j -го локомотива на s -й станции в момент времени $t+1$. Учтём, что j -й локомотив может появиться на s -й станции в момент времени $t+1$, если в момент времени $t+1-\tau^{ks}$ он отправился от станции с номером k до станции с номером s . В остальных случаях $y_j^s(t+1) = 0$. Таким образом:

$$y_j^s(t+1) = \sum_{k=1}^S u_j^{ks}(t+1-\tau^{ks}). \quad (5)$$

Рассмотрим динамику положения i -го состава на s -й станции в момент времени $t+1$:

$$z_i^s(t+1) = \sum_{k=1}^S \sum_{s=1}^S u_j^{ks}(t+1-\tau^{ks}) v_{ij}(t+1-\tau^{ks}) + z_i^s(t) \left(1 - \sum_{k=1}^S \sum_{s=1}^S u_j^{sk}(t) v_{ij}(t) \right) + (s, n(i)) x_{(n(i)-1)S+l(i)}(t), \quad (6)$$

где $\delta(s, k(i))=1$, если $s=k(i)$, и $\delta(s, k(i))=0$, если $s \neq k(i)$. В уравнении (6) отражено, что i -й состав может появиться на s -й станции в трёх случаях. В первом случае i -й состав может прийти из k -й станции, если он отправился в момент времени $t+1-\tau^{ks}$ с помощью j -го локомотива, где τ^{ks} – время в пути от станции k до станции s . Второй случай соответствует ситуации, когда i -й состав в момент времени t находился на s -й станции и в момент времени $t+1$ там же остался. В противном случае второе слагаемое будет равно нулю, поскольку выражение, записанное в скобках, будет равно нулю в силу того, что i -й состав отправился на станцию с номером $k \neq s$ с помощью j -го локомотива. Третий случай соответствует ситуации, когда i -й состав появляется случайным образом на s -й станции. Третье слагаемое равно единице только в том случае, когда s -я станция является первой станцией с номером $n(i)$ маршрута i -го состава.

Запишем выражение для общего грузопотока к моменту времени $t+1$ с учётом штрафа за перегонку локомотивов без груза:

$$c(t+1) = c(t) + \sum_{i \in I} \sum_{j=1}^S \sum_{s=1}^S u_j^{ks}(t) r^{ks}(t) m_i v_{ij}(t) - \sum_{j=1}^J \gamma_j \sum_{k=1}^S \sum_{s=1, s \neq k}^S u_j^{ks}(t) (1 - \sum_{i \in I} v_{ij}(t)), \quad (7)$$

где $r^{ks}(t)$ – длина пути локомотива, которую он пройдёт, начав движения в момент времени t от станции с номером k к моменту времени T , функция $r^{ks}(t) = \bar{r}^{ks} \min\{T-t, \tau^{ks}\}$, где \bar{r}^{ks} – длина пути, проходящего локомотивом от k -й станции до s -й станции в единицу времени, m_i – реализация случайной массы груза μ_i , перевозимого i -м составом, γ_j – штрафной коэффициент за перегонку j -го локомотива без груза. В уравнении (7) при фиксированном номере состава $i \in I$ только одно слагаемое в первой сумме равно единице, поскольку к локомотиву может быть приписан только один состав с единственным направлением движения. Данное слагаемое представляет собой произведение длины маршрута от k -й станции до s -й станции, умноженное на массу перевозимого груза. Вторая сумма соответствует штрафу за перегонку состава без груза. В ней j -е слагаемое будет равно γ_j , если j -й локомотив отправился от некоторой станции с номером k до станции с номером s и при этом к нему не прикреплен ни один состав.

Рассмотрим ограничения на управление.

Если j -й локомотив не может обслуживать некоторую станцию, то полагаем

$$u_j^{ks}(t) = 0, \text{ если } k \notin K_j \text{ или } k \notin K_j, \quad (8)$$

где K_j – множество станций, которые может обслуживать j -й локомотив.

Поскольку в момент $t=0$ некоторые локомотивы могут быть задействованы для перевозок уже движущихся составов, то их нельзя использовать до окончания их движения. Пусть t_j – момент, после которого j -й локомотив можно использовать для перевозки составов. Причём $t_j = \tau^{ks} - \tau^k - 1$, если j -й локомотив в момент времени $t = \tau_j < 0$ начал двигаться от станции s с номером k до станции s с номером s , где τ^{ks} – время, которое этот локомотив будет задействован для перевозки состава. Если j -й локомотив не используется в момент времени $t=0$ для перевозки составов, то $t_j = -1$. Тогда

$$u_j^{ks}(t) = 0 \text{ для всех } k, s = \overline{1, S}, t = \overline{0, t_j}. \quad (9)$$

Будем считать, что для обслуживания состава не может быть назначено более одного локомотива, т.е. для каждого $i \in I$ не более, чем одна переменная v_{ij} , $j = \overline{1, J}$, равна единице:

$$\sum_{i \in I} v_{ij}(t) \leq 1. \quad (10)$$

Будем также полагать, что каждый локомотив не может обслуживать более одного состава, т.е. для каждого $j = \overline{1, J}$ не более, чем одна переменная v_{ij} , $j = \overline{1, J}$, равна единице:

$$\sum_{j=1}^J v_{ij}(t) \leq 1. \quad (11)$$

Будем считать, что направление движения локомотива может быть задано единственным способом, т.е. для каждого $j = \overline{1, J}$ не более, чем одна переменная u_j^{ks} , $k = \overline{1, S}$, $s = \overline{1, S}$ равна единице:

$$\sum_{k=1}^S \sum_{s=1}^S u_j^{ks}(t) \leq 1. \quad (12)$$

Также запрещено использовать локомотив до прибытия в конечный пункт маршрута, т.е. при $u_j^{ks}(t) = 1$, что соответствует ситуации, когда в момент времени t j -й локомотив назначен по направлению от k -й станции до s -й станции, выполнено $u_j^{s_1 s_2}(t + \tau) = 0$ для любых станций s_1, s_2 и $\tau = 1, \tau^{ks} - 1$, поэтому

$$u_j^{ks}(t) \sum_{\tau=1}^{\tau^{ks}-1} \sum_{s_1=1}^S \sum_{s_2=1}^S u_j^{s_1 s_2}(t + \tau) = 0. \quad (13)$$

Локомотив с номером j можно отправить с i -м составом от станции с номером s_1 до станции с номером s_2 только в том случае, когда локомотив находится на станции s_1 и станция s_1 предшествует станции s_2 в маршруте следования i -го состава, т.е. когда в следующем неравенстве правая часть равна единице,:

$$u_j^{s_1 s_2}(t) v_{ij}(t) \leq z_i^{s_1}(t) \eta_i(s_1, s_2). \quad (14)$$

Локомотив с номером j может быть отправлен от станции k только в том случае, если он на ней находится:

$$u_j^{ks}(t) \leq y_j^k(t). \quad (15)$$

Следующее ограничение задаёт пропускную способность железнодорожного участка и соответствует количеству ниток по одному маршруту от станции k до станции s :

$$\sum_{j=1}^J u_j^{ks}(t) \leq a^{ks}(t), \quad (16)$$

$a^{ks}(t)$ – максимальное количество составов, которые можно отправить от станции k до станции s в момент времени t . Имеются ограничения на массу состава, перевозимого локомотивом:

$$v_{ij}(t) = 0, \text{ если } m_j^* < m_i. \quad (17)$$

Считается, что состав, находящийся на станции s , должен быть отправлен не позднее, чем через k временных промежутков после появления, т.е. не могут равняться единице более чем K переменных состояния системы $z_i^s(t)$ в различные моменты времени $t, \dots, t+K$:

$$z_i^s(t) z_i^s(t+1) z_i^s(t+2) \dots z_i^s(t+K) = 0, \quad (18)$$

Также считается, что локомотив не может находиться более L временных промежутков на станции s , если s не является станцией-депо ($s > D$), т.е. не более, чем L переменных состояния системы $y_j^s(t)$ в различные моменты времени $t, \dots, t+L$ равны единице:

$$y_j^s(t) y_j^s(t+1) y_j^s(t+2) \dots y_j^s(t+L) = 0, \quad s > D. \quad (19)$$

Обобщим условие (17) на случай случайной массы составов, т.е. потребуем, чтобы ограничение по массе состава выполнялось с заданной вероятностью, т.е.

$$v_{ij}(t) = 0, \text{ если } P\{m_j^* \leq \mu_i\} \geq 1 - \alpha, \quad j = \overline{1, J}, i \in I. \quad (20)$$

В качестве критерия качества управления выберем средний грузопоток с учётом штрафа за перегонку локомотивов без составов

$$\Phi_0(u, v) = \mathbf{M}[c(T) | x(0), \dots, x(T)]. \quad (21)$$

Тогда согласно (7) получаем

$$\Phi_0(u, v) = \sum_{t=0}^T \left[\sum_{i \in I} \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^S \sum_{s=1}^S u_j^{ks}(t) r^{ks}(t) \bar{m}_i v_{ij}(t) - \sum_{j=1}^J \gamma_j \sum_{k=1}^S \sum_{\substack{s=1 \\ s \neq k}}^S u_j^{ks}(t) (1 - \sum_{i \in I} v_{ij}(t)) \right], \quad (22)$$

где \bar{m}_i – средняя масса груза у i -го состава. Заметим, что по сути критерий (22) оценивает качество управления в момент времени $t=0$, т.к. управление в последующие моменты времени будут пересчитываться.

Таким образом, задача распределения локомотивов для перевозки составов состоит в максимизации критерия (22):

$$\Phi_0(u, v) \rightarrow \max_{u, v} \quad (23)$$

при выполнении ограничений (8)–(19), которые проверяются для динамической системы (5), (6). Здесь под u и v понимаются векторы, составленные из $u_j^{ks}(t)$ и $v_{ij}(t)$, $i \in I$, $j = \overline{1, J}$, $k = \overline{1, S}$, $s = \overline{1, S}$, $t = \overline{0, T}$.

Процедура принятия решений

Используем предложенную математическую модель распределения локомотивов по составам для формирования процедуры принятия решений для всех моментов времени $t=0, \dots, T$. С этой целью используем так называемую схему сценариев [2]. В этом случае процедура строится следующим образом.

1. Пусть решена задача (23) с начальным моментом $t=0$, тогда управление в момент $t=0$ будет выбрано. Пусть составы с назначенными локомотивами начинают двигаться и в момент $t=1$ занимают положение $z_i^s(1)$, $i \in I$, $s = \overline{1, S}$.
2. Пусть в момент $t=1$ появляются новые реализации $x(1), \dots, x(T)$ случайных векторов ξ_1, \dots, ξ_T , т.е. заново появляются составы. Будем теперь считать начальными векторами для системы (5), (6), (7) векторы $z_i(1)$, $y_j(1)$, $c(1)$, которые получаются после перехода от векторов состояния $z_i(0)$, $y_j(0)$, $c(0)$ в новое состояние с помощью найденного управления.

3. Решается задача (22) для нового начального состояния и новой реализации случайных векторов ξ_1, \dots, ξ_T . При этом интервал времени, для которого решается задача, составляет $[1, T+1]$. В результате этой процедуры находится управление в момент времени $t=1$.
4. Аналогичным образом находится управление на последующих шагах вплоть до момента времени $t=T$.

Заключение

В данной работе построена математическая модель оптимального назначения локомотивов для перевозок грузовых составов. Модель сформулирована как задача целочисленного стохастического программирования, для решения которой могут быть применены стандартные методы стохастического программирования [2].

Список литературы

1. Гапанович В.А., Епифанцев С.Н., Овсейчук В.А. Экономическая стратегия и электрофикация российских железных дорог / Под редакцией Г.П. Кутового – М.: Эко-Пресс, 2012.
2. Birge J., Louveaux F. Introduction to Stochastic Programming. New York: Springer-Verlag, 1997.

Машталер Ю.А., Матвиенко В.А., Алтунин В.П., ОАО «НИИАС», г. Москва
Такмазьян А.К., ООО «Програмпарк», г. Москва
Захарова Е.М., МФТИ, г. Москва

Планирование и мониторинг содержания локомотивов на установленную сменно-суточную потребность

Вступление

В задачах оперативного планирования одной из наиболее важных задач является распределение и использование ресурсов в соответствии с заданной потребностью с учетом особенностей конкретной области применения. Основной целью создания данной системы является повышение экономической эффективности деятельности ОАО «РЖД» за счет автоматизации планирования и управления локомотивными парками путем повышения качества, достоверности и систематизации информации для принятия решений. В рамках данной области решением задач управления тяговым хозяйством осуществляет комплекс подсистем, занимающихся задачей обеспечения перевозочного процесса требуемым количеством тягового подвижного состава (ТПС), их эффективной работой, оптимизацией планирования содержания локомотивов на установленную потребность, а также мониторинга содержания и показателей их использования.

В данной работе рассматривается одна из комплексов подсистем, предназначенная для решения задачи сменно-суточного планирования содержания локомотивов на установленную потребность. Объектом автоматизации являются производственные процессы сменно-суточного планирования по управлению процессами содержания локомотивов на примере эксплуатационных локомотивных депо Восточного полигона.

Постановка задачи

Формальная постановка задачи выглядит следующим образом: необходимо сравнить ожидаемое на плановые сутки количество содержания ТПС в эксплуатируемом парке с установленным по норме количеством по всем депо приписки и суммарно на всем тяговом полигоне отдельно для каждого вида тяги. Если ожидаемое количество ТПС не соответствует норме сменно-суточного содержания суммарно по всему тяговому полигону, алгоритм начинает работу по исправлению данной ситуации за счет перевода ТПС из технологического резерва в одно из состояний эксплуатируемого парка и наоборот.

Мультиагентные системы

Данная задача реализуемости потока запросов при ограниченных ресурсах характеризуется наличием трудностей, связанных с анализом и прогнозированием динамических характеристик данной системы.

Наиболее эффективный метод решения в таком случае обеспечивается методами имитационного моделирования. При этом использование мультиагентных систем как одного из инструментов данного подхода позволяет реализовать гибкие механизмы динамического поведения, автономности и адаптации отдельных компонентов имитационной модели.

Основной особенностью использования мультиагентных систем является то, что каждый логический объект сопоставляется с соответствующим ему программным агентом, который в свою очередь представляет интересы данного объекта. Каждый агент стремится достигнуть определенной цели, используя при этом заложенные в него стратегии их достижения, при этом не противореча основным ограничениям всей системы.

Данная подсистема содержит в себе несколько типов агентов, обеспечивающих достижение решения поставленной задачи сменно-суточного содержания локомотивов на установленную потребность. Агент верхнего уровня служит интерфейсом между «пользователем» (которым, зачастую, является другой агент) и рабочей средой, состоящей из множества агентов нижнего уровня, взаимодействующих между собой для поиска решения задачи. Кроме того, главный агент координирует работу агентов нижнего уровня, а также служит для них хранилищем общих данных. Агенты регионов предназначены для основных расчетных действий алгоритма: прогнозирование состояния эксплуатируемого парка на начало и в течение суток планирования, решение проблем нехватки или избытка локомотивного парка по всему тяговому полигону и отдельным депо. Агенты путей и агенты станций предназначены для расчета оптимального маршрута и соответствующего ему кратчайшего времени движения между двумя определенными станциями.

Алгоритм решения

Первым этапом решения поставленной задачи является проверка соответствия эксплуатируемого парка ТПС суточной норме суммарно по тяговому полигону по видам тяги. Для этого данная подсистема получает на вход следующие данные:

- Пономерной график проведения планового технического обслуживания ТПС с детализацией по депо ремонта, видам ремонта на тяговом полигоне.

- Пономерной список ТПС с информацией о состоянии в эксплуатируемом парке на текущий момент по депо приписки.
- Норма содержания ТПС в эксплуатируемом парке на планируемый период (сутки) суммарно по тяговому полигону.

Далее производится расчет наличия ТПС в эксплуатируемом парке на текущий момент. Для этого формируется перечень ТПС, содержащихся в эксплуатируемом парке на текущий момент, из которого исключаются ТПС, которые переведутся в неэксплуатируемый парк с начала планирования до 18-00 (начала рабочих суток) и добавляются ТПС, которые вернутся в эксплуатируемый парк из ремонта. Полученный результат характеризует фактическое наличие ТПС на начало планируемых суток.

Расчет прогнозируемого количества ТПС на планируемые сутки осуществляется аналогичным образом, но при этом результат формируется в локомотиво-сутках.

Вторым этапом алгоритма является сравнение полученного прогнозируемого количества ТПС в локомотиво-сутках с установленной нормой содержания ТПС по данному тяговому полигону и решение проблем их соответствия – дефицита или профицита наличия ТПС.

В случае дефицита необходимо принять меры для восполнения недостающего количества локомотиво-суток содержания ТПС в эксплуатируемом парке за счет возможного перевода ТПС из технологического резерва, то есть из неэксплуатируемого парка. При этом восполнение производится в первую очередь по депо с большей нехваткой. Для этого сначала рассчитывается прогнозируемое количество локомотиво-часов для каждого депо приписки данного региона и также сравнивается с нормами содержания. При этом возможны ситуации профицита отдельных депо при общем дефиците на полигоне. Далее формируется список ТПС, находящихся в настоящий момент в технологическом резерве и по которым не принято решение о переводе в эксплуатируемый парк, согласно графику проведения технологического резерва ТПС. Поэтому необходимо рассчитать целесообразность вывода того или иного ТПС из свободного технологического резерва с тем, чтобы выведенные ТПС максимально восполнили бы дефицит локомотиво-суток содержания локомотивов в эксплуатируемом парке суммарно по тяговому полигону, минимизируя дефицит по каждому депо приписки в отдельности.

При этом нужно учесть, что отдельные депо могут остаться с дефицитом или профицитом потому, что дефицит может быть перекрыт ближайшими депо с профицитом, например, в случае если депо дислокации

ТПС в технологическом резерве находится дальше, а депо с профицитом – ближе от депо с дефицитом. Кроме этого нужно учесть, что в некоторых случаях для перевода ТПС в эксплуатируемый парк из технологического резерва может потребоваться время на проведение ремонта и дополнительное обслуживание после проведения ремонта.

Для проведения вышеуказанных расчетов система получает дополнительную информацию о минимально возможных временах перехода ТПС в эксплуатируемый парк из свободного технологического резерва. Далее производится расчет прогнозного количества локомотиво-суток нахождения этих ТПС в эксплуатируемом парке. Полученные данные предназначены для качественной оценки целесообразности вывода того или иного ТПС из свободного технологического резерва. После установления конкретных ТПС, дат и времени их вывода из технологического резерва информация об этом передается в модуль управления ремонтами, который заполняет план перевода ТПС в пономерном графике проведения технологического обслуживания.

В случае профицита алгоритм совершает аналогичные расчеты со следующими особенностями. Во-первых, для сокращения избытка ТПС осуществляется их перевод в технологический резерв при условии, что эти ТПС простояли более 3-х суток в оперативном резерве. Это необходимо для того, чтобы выведенные ТПС максимально сократили бы излишнее количество локомотиво-суток содержания локомотивов в эксплуатируемом парке суммарно по тяговому полигону, минимизируя профицит по каждому депо приписки в отдельности. Кроме этого, в первую очередь выбираются ТПС с наименьшим линейным пробегом от последнего ремонта. Также должно быть учтено, что для перевода в технологический резерв ТПС должен следовать от текущего местоположения до депо приписки (или ближайший к депо приписки пункт оборота - если после выхода из резерва потребуется только ТО), так как в течение этого времени данный ТПС относится к содержанию в эксплуатируемом парке.

Расчет для локомотивов, находящихся на чужом регионе (ДРЛ)

При решении задачи сменно-суточного содержания локомотивов на установленную потребность нужно отдельно учитывать время работы ТПС, находящихся на регионе, отличном от его участка работы. Данная подзадача аппроксимируется задачей поиска наикратчайшего пути между двумя станциями – станцией нахождения локомотива и ближайшей станцией региона работы локомотива. Для найденного пути рассчитывается время работы локомотива в локомотиво-сутках на данном регионе. Данное решение использу-

ется для дальнейшего прогнозирования содержания ТПС в эксплуатируемом парке по регионам. Таким же образом рассчитываются времена работы локомотивов в процессе возвращения на свой регион работы с других участков.

Данная задача решается на основе мультиагентного алгоритма Дейкстры-Схолтен [1] (в данном случае, в варианте Чанди-Мисра, описанном в [2]).

Задача поиска кратчайшего пути между станциями ставится следующим образом. Дана сеть из N станций железной дороги. Станции соединены между собой путями, так что из любой можно каким-либо маршрутом попасть в любую, проезжая через промежуточные станции. Таких соединительных путей всего M , считая пути от станции A до станции B , и от станции B до A - разными. Маршрутом называется последовательность станций, упорядоченная по мере прохождения по ним поезда. Заданы нормативные времена хода поезда (локомотива) от любой станции до соседней с ней. Время хода в обратную сторону, вообще говоря, различается. Требуется найти маршрут, за кратчайшее время соединяющий две наперед заданные станции.

С формальной точки зрения железнодорожная сеть представляется в виде взвешенного двунаправленного графа. Каждая станция описывается одним узлом графа (таким образом, граф состоит из N узлов и M ребер). Пути от станции до станции (с учетом направления) представляют собой ребра графа. Нормативные времена хода по пути между соседними станциями представляют собой веса ребер графа. Весом маршрута называется суммарный вес всех ребер соединяющих входящие в него соседние станции. Задача состоит в определении маршрута наименьшего веса между двумя заданными станциями.

Входными данными для данного этапа решения служит взвешенный граф с ребрами, соединяющими узлы в обоих направлениях. Вес каждого ребра (или «расстояние») соответствует нормативной длительности хода поезда от одной станции до другой. При старте все данные загружаются в главный агент-интерфейс. После этого он создает вспомогательные агенты-станции и инициализирует их начальные данные. Эти данные для каждой станции состоят из имени станции, имени главного агента (для связи с ним, на данном этапе главным агентом для станции считается агент пути), уникального идентификатора станции, нормативного времени хода до всех ее соседей, а также их идентификаторы.

Назовем вес каждого направленного ребра – «расстоянием» между узлами или «длиной» (с учетом направления). Метод заключается в асинхронной рассылке узлами графа, которыми, в данном случае, являются агенты станций, своим соседям информации

о расстоянии от исходного узла. Назовем агента автора сообщения о длине – предком, а получателя – потомком. При этом для разных сообщений каждый агент может выступать в обеих ролях. Агент обменивается с другими агентами сообщениями двух видов:

- сообщение *length(L)*, которое означает, что, по сведению агента-предка, длина пути от начальной точки до агента-потомка равна L ;
- сообщение *ask*, которое означает, что агент-потомок обработал полученное ранее сообщение о длине и сообщает об этом агенту-предку.

Для каждого агента при передаче сообщения о длине потомками являются все его соседи, кроме предка.

Каждый агент станции имеет две переменные, управляющие процессом поиска: длина пути, *length*, от начальной станции до текущей, и количество, *num*, сообщений о длине пути, разосланных потомкам, на которые не получен ответ.

Рассмотрим шаги алгоритма подробнее:

1. Начальное значение расстояния от начала маршрута для всех узлов графа равно бесконечности: *length = infity*. Начальное значение разосланных сообщений без ответа *num=0*.
2. Главный агент получает запрос на поиск пути от станции A до некоторой другой станции B и посылает агенту A сообщение о длине пути от A до A : *length(0)*. Поиск заканчивается, когда главный агент получает от агента A сообщение *ack*.
3. Каждый агент, который хранит у себя конечное значение о длине пути, хранит также и имя агента-соседа, от которого он его получил. Этот сосед называется «предком».
4. Каждый узел, который получил сообщение *length* от соседа, сравнивает полученное значение с хранящимся в своей ячейке.
 - 4.1 Если полученное значение меньше, чем хранимое, то:
 - посылает ранее запомненному «предку» (если он есть) сообщение «*ack*», об окончании обработки предыдущего значения длины пути;
 - записывает себе новое значение и запоминает соседа, от которого пришло данное сообщение, как «предка»;
 - рассылает всем остальным соседям сообщение о длине пути от начала до них, используя информацию о расстоянии до них;
 - увеличивает свою переменную *num* на то количество сообщений, которое он разослал.
 - 4.2 Если полученное значение *length* больше хранимого, то агенту отправителю посылается сообщение «*ack*».
5. Каждый узел, который получил сообщение «*ack*», уменьшает свое значение *num* на единицу. Если по-

сле этого оказывается, что $\text{num}=0$, то узел посылает сообщение «ask» своему «предку».

Данный алгоритм является мультиагентным вариантом алгоритма Дейкстры поиска кратчайшего пути на взвешенном графе. Поскольку алгоритм Дейкстры является «жадным» (монотонно меняется значение целевой функции длины пути для агентов), то его сходимость обеспечивается неотрицательностью длин ребер графа. Дейкстрой и Схолтен [1] было показано, что рассылка сообщений типа *ask* гарантирует передачу информации о завершении алгоритма управляющему агенту.

Итак, при выполнении алгоритма, гарантируется определение маршрута локомотива от станции дислокации в депо приписки. После чего, зная принадлежности станций соответствующим регионам управления, легко вычислить время нахождения локомотива (при условии, что он непрерывно в пути) на каждом проходимом им регионе.

Выводы

Данная работа посвящена разработке системы, решающей задачу сменно-суточного планирования содержания локомотивов на установленную потребность. Для обеспечения гибких механизмов динамического поведения, автономности и адаптации отдельных компонентов имитационной модели было предложено использование мультиагентного подхода. Мультиагентные методы эффективно используются при решении задач оптимального планирования для повышения быстродействия при распределенном

подходе за счет редукции большой централизованной задачи к множеству более мелких задач пониженной сложности и уменьшения вычислительной трудоемкости каждой из них путем замены глобальной целевой функции – локальными. Мультиагентные системы дают возможность составлять более реалистичные прогнозы за счет учета стратегий поведения и предпочтений каждого объекта в отдельности наилучшим образом, соответствующего всем поставленным условиям и ограничениям.

В работе разработан алгоритм для мультиагентной системы управления в железнодорожном комплексе, решающей задачу сменно-суточного планирования локомотивов на установленную потребность. Предложен алгоритм для осуществления планирования и управления процессами содержания ТПС на установленную потребность, а также мониторинга содержания локомотивов и показателей их использования, его реализация на языке *Jason*, а также приведены результаты работы этого алгоритма на практике на примере Восточного полигона.

Литература

1. E. W. Dijkstra and C. S. Scholten “Termination detection for diffusing computations” // *Information Processing Letters* 11, 1: 1–4, 1980.
2. K. M. Chandy and J. Misra “Distributed Computation on Graphs: Shortest Path Algorithms” // *Communications of the ACM*, November 1982, Volume 25, #11.

Феофилов А.Н., ОАО «НИИАС», г. Москва

Концепция интеллектуальной системы оперативного управления парком грузовых вагонов.

В условиях развития рыночных отношений требуются такие методы управления, которые позволят управлять грузовыми перевозками не только по техническим нормам, но и по экономическим нормативам. В этой связи для описания функционирования железнодорожного транспорта была предложена новая экономическая модель управления грузовыми перевозками, полученная на основе методов оптимизации использования самого массового ресурса железнодорожного транспорта – вагонов грузового парка [1].

Соответственно для реализации указанной экономической модели оперативного управления необходимо разработать интеллектуальную систему управления парком грузовых вагонов, позволяющую повысить эффективность работы каждого диспетчера и смены в целом.

В настоящее время в ОАО «НИИАС» ведется разработка «Единой интеллектуальной системы управления и автоматизации производственных процессов на железнодорожном транспорте (ИСУЖТ)». Кроме того ОАО «НИИАС» провел две научно-технические конференции «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте» ИСУЖТ-2012 и ИСУЖТ-2013. Однако до сих пор в железнодорожной литературе не сформулировано определение интеллектуальной системы управления на железнодорожном транспорте. Конечно, на это есть свои причины.

На первом этапе развития кибернетики в популярной печати горячо обсуждался вопрос: может ли машина мыслить? Но ответа тогда найдено не было. Оказалось, что для ответа требуется, по крайней мере, знать, что такое мышление [2]. С тех пор прошло более 50 лет, в течение которых была разработана шахматная программа, способная обыгрывать гроссмейстеров, но до сих пор дать содержательное определение понятию мышления никому не удалось, хотя оно интуитивно известно каждому [3].

Поэтому с практической точки зрения весьма перспективными представляются исследования в области создания искусственного интеллекта, в которой проблема изучения моделирования мышления позиционирует от общих постановок к частным прикладным направлениям искусственного интеллекта (игра в шахматы, распознавание образов, моделирование поведения биологических и искусственных систем, принятие решений в системах управления и другие), по которым в дальнейшем, возможно, могут быть найдены конкретные решения.

Опираясь на исследования в области искусственного интеллекта, сформулируем технические требования к интеллектуальной системе управления парком грузовых вагонов (ИСУПВ). Для этого необходимо определить её основные отличия от ранее разработанной с участием автора системы управления вагонным парком ДИСПАРК.

Существующие в настоящее время информационные технологии, входящие в ДИСПАРК, предназначены в основном для обеспечения информационной поддержки принятия решений причастными работниками на всех уровнях управляющей вертикали ОАО «РЖД» на основе оперативной обработки баз данных о вагонном парке, представляющими собой сетевую, дорожные и вагонные модели линейного уровня.

Интеллектуальная система управления парком вагонов должна в дополнении к перечисленным иметь ещё качественно новые «интеллектуальные» свойства:

- 1) способность к целенаправленному поведению в любых производственных ситуациях;
- 2) способность к адаптации при изменении условий окружающей среды;
- 3) способность к обучению и формированию баз знаний о взаимодействии окружающей среды и ИСУПВ;
- 4) способность к применению полученных знаний для принятия решения и организации его исполнения в изменяющихся условиях окружающей среды.

Определим окружающую среду как дискретную ситуационную сеть пользователей, формирующую спрос на транспортные услуги. В зависимости от состояния окружающей среды и состояния ИСУПВ возникают различные производственные ситуации, требующие выполнения определенных действий ИСУПВ.

Под базой знаний ИСУПВ будем понимать семантическую модель управления парком вагонов, отражающую различные варианты технологий управления эксплуатационной работой в нормативных условиях и целенаправленные стратегии управления вагонными парками в нестандартных условиях.

Первые два требования к ИСУПВ представляют собой принцип рационального управления, который также использован и в системе ДИСПАРК. Отличие в том, что в ДИСПАРК рациональное управление реализуется оперативным персоналом, а в ИСУПВ этот принцип реализуется самой интеллектуальной программой управления. То есть интеллектуальная систе-

ма управления парком вагонов должна включать как традиционную модель управления на основе обработки баз данных о работе вагонного парка, так и принципиально новые модели принятия решений на основе использования баз знаний ИСУПВ.

Определим ИСУПВ как модель целенаправленного управления парком вагонов в любой производственной ситуации, которая может адекватно приспосабливаться к изменяющимся условиям окружающей среды на основе способности к обучению и формированию баз знаний по управлению парком вагонов.

Согласно модели ситуационного поведения профессора Д.А. Поспелова возможны два вида поведения системы в процессе управления – это нормативное и ситуационное поведение. Нормативное поведение системы определяется заданным набором нормативных предписаний, выполняемых в нормативных условиях работы. При нарушении нормативных правил система переходит к ситуационному поведению, которое характеризуется поставленными целями и определением плана их достижения [4].

Указанные нормативные предписания являются правилами постановки, которые представляют собой утверждения типа: «Если имеет место определенная производственная ситуация, то необходимо выполнить заданное действие». Эти постановки могут быть либо рациональными, имеющими осознанные цели, либо интуитивными – с неосознанными целями. Набор таких правил образует базу знаний ИСУПВ. Если решения значительной части производственных ситуаций будут описаны в виде правил постановки, то исходная производственная задача превращается в алгоритмическую задачу поиска решения, то есть будет решена [3].

Система ИСУПВ может работать в нормативном режиме, либо в режиме ситуационного управления (см. рис. 1). При нормативной работе система должна самостоятельно справляться с текущими проблемами, а диспетчер должен только контролировать её работу. В случае возникновения нестандартной ситуации, требующей вмешательства диспетчера, система переходит на режим ситуационного управления, выполняет анализ ситуации, производит поиск плана работы в соответствии с поставленными целями и затем выводит эту информацию диспетчеру. Диспетчер может либо принять этот план к исполнению, либо задать свой вариант плана и выполнить его. В случае удачного решения проблемы, система запоминает указанную производственную ситуацию и выполненное действие в виде нового правила постановки и записывает его в базе знаний ИСУПВ.

В начале эксплуатации ИСУПВ база знаний будет пустой, затем в процессе решения проблем диспет-

чером в режиме ситуационного управления система будет накапливать новые правила постановки и, в перспективе, диспетчер будет только контролировать работу системы в нормативном режиме. Таким образом, реализуется способность ИСУПВ к обучению и формированию баз знаний и способность к применению полученных знаний для принятия решения и организации его исполнения.



Рис. 1. Режимы работы ИСУПВ

Кроме интеллектуальных свойств ИСУПВ для реализации экономической модели управления должна обладать следующими аналитическими свойствами:

- 1) возможность выдавать пользователю не только оптимальный оперативный план работы, рассчитанный по определенному критерию эффективности, но и его стоимостную оценку в рублях, т.е. расчётные значения полученных доходов, эксплуатационных расходов и прибыли от перевозок;
- 2) пользователь может либо принять этот план к исполнению, либо задать свой вариант плана, но при этом система также рассчитает его стоимостную оценку;
- 3) по окончании смены система должна оценить фактические результаты работы по эксплуатационным и стоимостным показателям, а также оценить работу самого пользователя, например, по 4-х бальной шкале: неудовлетворительно; удовлетворительно; хорошо; отлично [5].

Для обеспечения выполнения заданных целей ИСУПВ должна содержать следующие функциональные подсистемы:

- почасового учёта использования вагонов рабочего парка;
- планирования грузовых перевозок;
- регулирования эксплуатационной работы;
- анализа эксплуатационной работы.

По составу подсистема ИСУПВ представляет собой модернизированный вариант существующей системы управления вагонным парком ДИСПАРК с расширенным составом функций. Перечисленные подсистемы ИСУПВ должны быть объединены с соответствующими подсистемами ДИСПАРК. Например, подсистема почасового учёта использования вагонов рабочего парка ИСУПВ должна не заменить, а дополнить существующую подсистему пономерного учёта вагонов ДИСПАРК.

Подсистема почасового учёта использования вагонов рабочего парка осуществляет учёт затраченных вагоно-часов рабочего парка и рассчитывает основные эксплуатационные (рабочий парк, оборот вагонов) и экономические (эксплуатационные расходы) показатели по затраченным вагоно-часам.

Подсистема планирования грузовых перевозок обеспечивает расчет оптимального плана перевозок на следующие сутки по выбранному критерию с определением его стоимостной оценки.

Подсистема регулирования эксплуатационной работы обеспечивает выполнение плана перевозок по критерию минимизации эксплуатационных расходов или минимизации затраченных вагоно-часов рабочего парка.

Подсистема анализа эксплуатационной работы по концу отчетных суток или по запросу в любой момент времени должна дать объективную оценку полученных результатов по натуральным и экономическим показателям.

Покажем на примере Центральной дирекции управления движением (ЦД) ОАО «РЖД», как практически должна функционировать указанная ИСУПВ.

На всех уровнях управления ЦД у всех лиц, принимающих решения (пользователей), имеются специализированные АРМы, объединенные в единую интеллектуальную систему управления.

Указанный АРМ постоянно в режиме реального времени осуществляет мониторинг соответствующего объекта управления, определяемого совокупностью

эксплуатационных показателей (погрузка, выгрузка, рабочий парк, сдача вагонов), характеризующих данный бизнес-процесс, прогнозирует его функционирование до конца суток и определяет возможные затруднения в работе в предстоящий период.

По определенному регламенту или при необходимости вмешательства в бизнес-процесс, АРМ выводит на экран для пользователя сообщение с анализом текущей ситуации, описанием выявленных затруднений и дает список возможных управляющих решений в данной ситуации с оценкой конечных результатов, как по технологическим, так и по экономическим показателям. Пользователь может либо выбрать любое из рекомендованных решений, либо предложить свой вариант. В этом случае АРМ рассчитывает оценку конечного результата и отправит полученное решение на исполнение.

В конце смены ИСУПВ даст экономическую оценку работы каждого пользователя и смены в целом. Таким образом, ЦД будет управлять грузовыми перевозками по экономическим критериям, а подсистема учета и анализа работы будет определять объективную оценку полученных результатов по технологическим и экономическим показателям.

Литература

1. Феофилов А.Н. О бизнес-модели управления грузовыми перевозками // Железнодорожный транспорт. – 2012. – № 9. – С. 16-19.
2. Шамис А.Л. Поведение, восприятие, мышление: проблемы создания искусственного интеллекта. – М.: Едиториал УРСС, 2005. – 224 с.
3. Уитби Б. Искусственный интеллект: реальна ли Матрица – М.: ФА-ИР-ПРЕСС, 2004. – 224 с.
4. Газе-Рапопорт М.Г., Поспелов Д.А. От амебы до робота: модели поведения. – Издание 2-е. – М.: Едиториал УРСС, 2004. – 296 с.
5. Феофилов А.Н. Универсальные критерии эффективности для интеллектуальной системы управления грузовыми перевозками / «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте» (ИСУЖТ-2013): Труды второй научно-технической конференции, 21-22 октября 2013 г. – М.: ОАО «НИИАС», 2013. – С. 69-73.

Залуцкий М.И., ОАО «НИИАС», г. Москва

Совершенствование алгоритмов расчета перерабатывающей способности станций и железнодорожных путей необщего пользования в автоматизированных системах

В настоящее время для организации стабильной работы станции примыкания и железнодорожных путей необщего пользования требуется определение результирующей перерабатывающей способности.

При оценке инфраструктур общего и необщего пользования на возможность пропуска и переработки вагонопотока ключевым фактором является определение результирующей пропускной и перерабатывающей способностей станции примыкания и железнодорожных путей необщего пользования. Это обусловлено взаимодействием указанных технологических объектов друг с другом. Расчет без учета взаимодействия не показывает полную картину, а только узкие места в работе отдельного технологического объекта.

Предлагаемый подход к определению результирующей перерабатывающей способности станции состоит в построении ориентированного графа станции примыкания и железнодорожного пути необщего пользования, ребрами которого являются технологические элементы, а узлами их границы. Каждому элементу присваивается значение вагонопотока, следующего по элементу, и коэффициент загрузки технических устройств.

Объединенный граф представляет собой все возможные пути следования вагонопотоков по станции примыкания и железнодорожным путям необщего пользования. Начальными и конечными вершинами графа являются перегоны, прилегающие к станции примыкания. Из объединенного графа можно вырезать подграфы, используемые в дальнейшем для рассмотрения конкретной категории вагонопотока с индивидуальными характеристиками.

Особенностью предлагаемого подхода к определению результирующей перерабатывающей способности станции примыкания и путей необщего пользования является возможность установления ограничивающего элемента для отдельных категорий вагонопотоков на протяжении всего следования по станции примыкания и железнодорожным путям необщего пользования.

Преимущество в использовании связанного ориентированного графа для представления технологии работы станции примыкания и железнодорожного пути необщего пользования состоит в комплексном подходе, учитывающем технологию работы всех технологических элементов.

Построение графа, отображающего все возможные варианты следования вагонопотоков по станции примыкания и железнодорожным путям необщего пользования, позволяет учесть в расчетах вагонопотоки с различными базовыми характеристиками и технологию работы с ними, а также установить какое влияние они оказывают на перерабатывающую способность.

Алгоритм расчета состоит в определении для каждой струи вагонопотока технологического элемента с максимальным значением коэффициента использования пропускной или перерабатывающей способности. Указанный элемент будет ограничивающим. На основании информации о размерах вагонопотоков, следующих по ограничивающему устройству, и их характеристиках осуществляется расчет максимально допустимого потока, который можно адресовать на соответствующий железнодорожный путь необщего пользования.

На данный момент интегрированная оценка позволяет определить результирующую пропускную и перерабатывающую способности станции примыкания и каждого железнодорожного пути необщего пользования, участвующего в расчете, с учетом процента маршрутизации перевозок. Важность определения данного параметра подтверждается изменением возможностей инфраструктуры общего и необщего пользования по переработке вагонопотока в зависимости от его маршрутизации.

Преимуществом предлагаемого подхода является возможность его интегрирования с полигонными автоматизированными системами управления вагоно- и поездопотоками. Таким образом, используя данный алгоритм, представляется возможным прогнозировать путь следования вагонопотоков непосредственно с мест погрузки до мест выгрузки вплоть до грузовых фронтов, с учетом возможностей инфраструктуры не только общего, но и необщего пользования.

Расчет пропускной и перерабатывающей способностей станции примыкания и путей необщего пользования должен производиться с учетом уровня маршрутизации и доли обезличенного парка вагонов. Потому как результирующая перерабатывающая способность железнодорожных путей необщего пользования и станции примыкания при одном и том же путевом развитии и техническом оснащении может

изменяться в зависимости от неоднородности вагонопотоков, следующих в адрес путей необщего пользования, и количества вагонов, управляемых разными операторами подвижного состава.

Перерабатывающая способность комплекса железнодорожных путей необщего пользования и станции примыкания состоит из:

- расчета максимальной перерабатывающей способности каждого железнодорожного пути необщего пользования;
- расчета максимальной пропускной и перерабатывающей способности станции примыкания;
- определения результирующей перерабатывающей способности комплекса железнодорожных путей необщего пользования и станции примыкания.

Технология работы с поездами различных категорий влияет на величину перерабатывающей способности, как отдельных устройств, так и станции в целом. В зависимости от того, какой объем работы необходимо выполнить с вагонами, прибывающими в адрес путей необщего пользования, будет увеличиваться или уменьшаться загрузка соответствующих технических устройств.

На первом этапе определяется перерабатывающая способность отдельных технических устройств для железнодорожных путей необщего пользования и железнодорожных станций примыкания (перегоны, парки, горловины, вытяжные пути и т.д.)

Для определения результирующей перерабатывающей способности следует составить схему графа, ребрами которого являются элементы станции и пути необщего пользования. Далее на них наносятся пропускная и перерабатывающая способности, рассчитанные в соответствии с Инструкцией по расчету наличной пропускной способности железных дорог.

Рассмотрим пример расчета перерабатывающей способности для входящего потока. Схема графа приведена на рисунке 1.

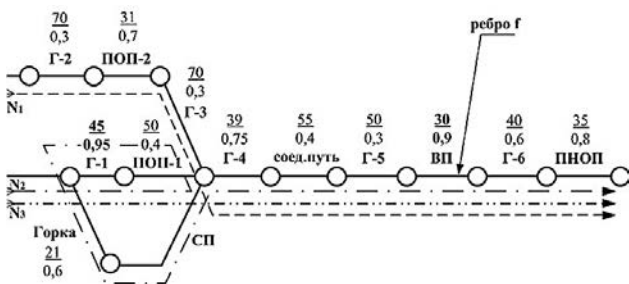


Рис.1. Пример схемы графа элементов станции примыкания и пути необщего пользования

Условные обозначения:

N_1, N_2, N_3 – вагонопотоки в адрес путей необщего пользования;

Г – горловина;

ПОП – приемо-отправочный парк;

СП – сортировочный парк;

ВП – выставочные пути;

ПНОП – путь необщего пользования;

50 – наличная перерабатывающая способность, составов/сут;

0,4 – коэффициент использования элемента.

Результирующая перерабатывающая способность станции примыкания и путей необщего пользования задается в виде пары значений либо в виде зависимости (нескольких пар значений):

$$\{ N_{вх}; Y_{м.приб} \},$$

Где $N_{вх}$ – результирующая мощность станции по входящему вагонопотоку на пути необщего пользования, вагонов/сут;

$Y_{м.приб}$ – уровень маршрутизации, при котором рассчитана $N_{вх}$:

$$Y_{м.приб} = N_{приб.м} / (N_{приб.м} + N_{приб.нм}),$$

где $N_{приб.м}$ – маршрутизированный вагонопоток;

$N_{приб.нм}$ – немаршрутизированный вагонопоток.

Величина $N_{вх}$ рассчитывается следующим порядком. Вводится ориентированный граф, ребрами которого являются элементы станции, по которым рассчитывается пропускная и перерабатывающая способность. На каждом ребре графа f заданы:

$n_{нал.f}$ – наличная пропускная (перерабатывающая) способность элемента станции f , составов/сут;

γ_f – технически допустимый уровень использования пропускной способности элемента станции f (с учетом величины парка маневровых локомотивов, доступного для привлечения к работе на станции);

Наличная пропускная способность для вагонопотока (вагонов/сут) по элементу станции f определяется:

$$N_f = n_{нал.f} m_f$$

где m_f – количество вагонов в составе.

На каждом подходе к станции примыкания заданы: $N_{вх.м}, N_{вх.нм}$ – маршрутизированный (немаршрутизированный) вагонопоток на пути необщего пользования, вагонов/сут, поступающий на станцию с данного подхода.

На графе элементов станции определяется дерево D путей следования маршрутизированного (немаршрутизированного) вагонопотока на пути необщего пользования с каждого подхода к станции.

Далее рассмотрим порядок расчета для маршрутизированного (немаршрутизированного) вагонопотока:

На пути от подхода к пути необщего пользования выбирается ребро f с максимальным коэффициентом использования наличной пропускной способности. В соответствии с примером, для вагонопотока N_1 прибывающего с подхода А элемент ВП является ограничи-

вающим. Далее необходимо найти соотношение струй вагонопотоков, проходящих по данному элементу, и определить величину пропускной (перерабатывающей) способности для данной струи:

$$N_{\text{вх},j} = N_f N_j / \sum N_f,$$

где $N_{\text{вх},j}$ – результирующая мощность по j -ому входящему вагонопотоку на пути необщего пользования, вагонов/сут;

N_j – величина j -ого входящего вагонопотока, вагонов/сут;

$\sum N_f$ – суммарная величина входящего вагонопотока, проходящего по ребру f .

Соответственно перерабатывающая способность для вагонопотока N_1 будет равна:

$$N_{\text{вх},1} = 30m_{f1}N_1/(N_1+N_2+N_3).$$

Аналогичный расчет производится для остальных потоков, входящих на станцию.

Суммарная результирующая мощность станции примыкания, доступная для входящего вагонопотока на пути необщего пользования:

$$N_{\text{вх}} = \sum N_{\text{вх},j};$$

$$N_{\text{вх}} = 30m_{f1}N_1/(N_1+N_2+N_3) + 45m_{f2}N_2/(N_2+N_3) + 45m_{f3}N_3/(N_2+N_3).$$

Аналогичный расчет выполняется для выходящего потока с путей необщего пользования, результаты которого зависят от доли обезличенного парка вагонов.

При выполнении расчетов для входящего и выходящего вагонопотока, перерабатывающая способность всего комплекса станция примыкания – пути необщего пользования определяется, как минимальное из двух расчетных значений:

$$N_{\text{пер,итог}} = \min\{N_{\text{вх}}; N_{\text{вых}}\}.$$

Дальнейшее развитие алгоритмов определения результирующей перерабатывающей способности предполагает исследование влияния ряда базовых характеристик вагонопотоков: род груза, количество групп в составе и длина прибывающего поезда.

Рубцов Д.В., Галкин А.О., ОАО «НИИАС», г. Москва

Автоматизированная подготовка предложений по организации вагонопотоков на железнодорожном полигоне на основе исполненных вагонопотоков и ограничений инфраструктуры

Изменения плана формирования грузовых поездов регулярно осуществляются на региональном и центральном уровне Дирекций управления движением для оперативного ускорения продвижения вагонопотоков, обеспечения выполнения сроков доставки грузов, а также решения ряда других технологических задач. В условиях ограниченности производственно-экономических ресурсов одним из основных вариантов решения задачи освоения объемов перевозок является корректировка технологии организации вагонопотоков без наращивания производственных мощностей.

Существующие системы организации вагонопотоков должны обеспечивать автоматизированную поддержку принятия решений о внесении изменений в план формирования грузовых поездов.

Программный комплекс Автоматизированная система организации вагонопотоков (АСОВ), разработки ОАО «НИИАС», на данный момент является основным перспективным проектом в сфере задач

ведения, расчета и анализа плана формирования поездов. Основной инструментарий текущей очереди развития частично решает задачу автоматизации внесения изменений в план формирования. Решается задача создания цепочек технологических операций по корректировке плана формирования, позволяющих пошагово вести пользователя от причины, вызвавшей необходимость внесения изменений, до внесения изменения плана формирования поездов по нескольким станциям одновременно.

Дальнейшее развитие заложенной в данную систему идеологии должно предполагать: классификацию причин вызывающих необходимость изменения плана формирования грузовых поездов; анализ существующей технологии организации вагонопотоков, в том числе с учетом исполненных перевозок; автоматизированную выработку вариантов технологии организации вагонопотоков, их имитационную оценку, ввод в действие с возможностью гибкой настройки.

Регулярно возникающие причины изменения системы организации вагонопотоков, вызывающие необходимость внесения изменений в план формирования поездов, могут быть сгруппированы по возможным вариантам их решения. Уникальные, ни разу не повторяющиеся причины встречаются редко и, как правило, являются предпосылкой или следствием крупного нарушения существующей технологии организации вагонопотоков.

При классификации основных причин, инициирующих изменения плана формирования грузовых поездов можно выделить причины, полученные в результате **анализа исполненных перевозок**, а также причины, возникающие в оперативных условиях из-за **ограничений инфраструктуры**.

Выявление причин корректировки плана формирования на основе данных об исполненных перевозках должно предусматривать исследование ситуаций, когда на длительном отрезке времени происходит отклонение фактических вагонопотоков от технологии их продвижения в соответствии с планом формирования. Такие нарушения, как правило, связаны с тем, что на каком либо направлении появились технические возможности формировать назначение не предусмотренное планом формирования, но оптимизирующие работу станции по критерию сокращения простоя вагонов, а также критерию повышения эффективности использования возможностей путевого развития. Примером другой, обратной ситуации может быть станция, на которой не формируется назначение, предусмотренное планом формирования. Это может происходить по разным причинам: отсутствие вагонопотока соответствующего назначения, перенаправление данного вагонопотока на другие станции плана формирования, где есть резерв возможностей путевого развития для формирования групп соответствующих назначений и так далее.

В обоих случаях система должна вести автоматизированное слежение за изменениями структуры вагонопотоков и их проекцию на план формирования поездов. Осуществляя регулярный контроль по временным срезам различной глубины, система сможет выявлять конкретные назначения со станций плана формирования, которые нуждаются в пересмотре и изменении.

После автоматизированного выявления необходимости внесения изменений в план формирования поездов, а также определения типа причины должна происходить инициация создания корректировки плана формирования. Автоматизированная выработка решений по изменению плана формирования поездов на основе **анализа выполненных вагонопотоков** должна осуществляться в следующих направлениях:

- включение новых назначений на направлениях, где поезда формируются сверх плана формирования

грузовых поездов на протяжении длительного периода времени.

Система, при выявлении необходимости использования данного решения, должна инициировать создание корректировки плана формирования, включающей станции, формирующие назначения сверх плана формирования, описание данных назначений, а также групп и областей включения в их составе. Пользователю необходимо подтвердить автоматизированные предложения по переносу отдельных областей включения в новые назначения, или отменить их частично, либо полностью.

- исключение длительно отсутствующих в ходу назначений, не связанных с сезонностью перевозок различных родов груза, а также специализированных перевозок, с последующим распределением высвободившихся областей включения плана формирования.

Реализуя данное решение, система должна создавать корректировку плана формирования, включающую станции, на которых фактически не формируются определённые назначения, описание назначений фактически выполняемых, а также интерфейс перераспределения высвободившихся групп и областей включения. Интерфейс должен не просто предоставлять выбор из всех формируемых назначений, а представлять пользователю предлагаемый вариант распределения, основанный на расчете эксплуатационных затрат, когда дальнейшее следование вагонов будет наиболее эффективным.

- перераспределение отдельных областей включения между существующими назначениями для интенсификации процесса формирования поездов на сортировочных станциях и снижения простоя вагонов под накоплением.

Определяя необходимость применения данного решения, система должна формировать перечень назначений плана формирования, вагонопоток по которым на выбранном временном периоде не превышает заданного пользователем количества поездов в сутки. Далее, по выбранным пользователем назначениям, система автоматически должна создавать корректировку плана формирования со станциями зарождения данных назначений. Автоматическим предложением должно являться перераспределение областей включения таким образом, чтобы дополнить вышеуказанные назначения, стабильно поступающим на станцию потоком с сохранением экономической эффективности перевозки.

Анализ необходимости выполнения указанных выше изменений необходимо выполнять по настраиваемым срезам модели исполненных перевозок, с исключением из учета оперативных корректировок пла-

на формирования поездов для устранения последствий различных нарушений и другого рода нештатных ситуаций, которые должны быть помечены в системе ведения базы плана формирования особым признаком. Отмеченные данным признаком станции, не должны быть доступны для автоматизированного добавления в корректировку плана формирования, созданную на основе анализа исполненных вагонопоковок, и могут быть только включены пользователем вручную.

Для анализа наличия причин изменения плана формирования, возникающих из-за **ограничений возможностей инфраструктуры** основополагающим подходом является использование результатов работы автоматизированной системы прогноза ресурсов сети (АС ПРОГРЕСС).

АС ПРОГРЕСС обеспечивает оценку возможности освоения прогнозных объемов перевозок с учетом существующих параметров инфраструктуры, обеспечения тяговыми ресурсами, а также необходимости проведения регламентных ремонтно-путевых работ, позволяет выявить узкие места и определить те технологические объекты (участки и станции), нагрузка на которые будет превышать их пропускные и перерабатывающие способности.

Оценив плановую шахматку погрузки, переведя ее в плановые межстанционные корреспонденции и наложив их на сеть ОАО «РЖД» система получает, по сути, анализ исполненной модели перевозок не в разрезе прошлых периодов времени, а на плановый месяц. Так как АС ПРОГРЕСС использует нормативную технологию организации вагонопотоков, образование назначений сверх плана формирования невозможно, однако, анализу могут быть доступны назначения плана формирования, на которые фактически будет приходиться минимальное количество вагонов в сутки, что уже может служить причиной корректировки плана формирования.

По технологическим объектам, являющимся в соответствии с расчетом АС ПРОГРЕСС инфраструктурными ограничениями, также могут инициироваться корректировки плана формирования. Данные корректировки либо признаны временно снять ограничения, в связи с недолгим действием мероприятий их вызывающих, либо откорректировать технологию организации вагонопотоков так, чтобы исключить возможность повторного возникновения затруднений на выделенных технологических объектах.

Для подготовки предложений по организации вагонопотоков на железнодорожном полигоне по причине ограничений инфраструктуры должен осуществляться выбор основных ограничивающих элементов по направлениям внутри железнодорожного полигона, выделение назначений плана формирования, соз-

дающих нагрузку на данный элемент, и далее – анализ возможных вариантов:

- корректировки пути следования выделенных назначений;
- изменения областей включения выделенных назначений;
- отмены выделенных назначений с перераспределением потоков по другим существующим назначениям плана формирования.

Для автоматизированной подготовки предложений должна осуществляться имитационная проверка, моделирующая ситуацию, в которой нагрузка будет перераспределена на другие элементы полигона, с дальнейшим выявлением возможности возникновения новых инфраструктурных ограничений. При имитационной проверке должен формироваться полигон корректировки плана формирования, включающий все назначения, проходящие, начинающиеся или заканчивающиеся на ограничивающем элементе. Далее, по данным назначениям должна осуществляться проверка возможности изменения пути следования (для снятия нагрузки с ограничений по пропускной способности участков) и возможность изменения набора назначений. Оценка возможности корректировки параметров назначений плана формирования должна осуществляться на основе принципа достижения экономической эффективности с учетом эксплуатационных затрат. Ограничивающий элемент должен либо принимать участие в расчете с откорректированными характеристиками, либо быть исключен из расчета.

В качестве примера рекомендаций по корректировке плана формирования, можно рассматривать ситуацию с инфраструктурными ограничениями на направлении Батайск – порты Северо-Кавказской железной дороги. Генерируемая системой корректировка должна обеспечивать единую технологию работы станций Батайск, Тихорецкая, Краснодар-Сорт, Разъезд 9 км и Крымская. Данные станции формируют назначения, проходящие по ограничивающим участкам с высокими размерами пассажирского движения, что вызывает необходимость оптимального распределения поездопотоков по полигону.

Таким образом, система должна обеспечивать создание корректировки, включающей сами назначения с данных станций в направлении портов, а также вариант перераспределения вагонопотоков. Станция Батайск, работая на дальнем подходе, должна формировать назначения, необходимые для снижения времени накопления на станции Разъезд 9 км, а также сквозные назначения до станции Новороссийск. Для снижения загрузки участка Батайск - Тимашевская система должна представлять рекомендации по переключению части вагонопотока в назначения на станцию Тихорецкая, с

последующим включением групп в состав поездов в адрес станции Краснодар-Сорт. Кроме того, одним из вариантов предлагаемых решений может являться ввод новых сквозных назначений следующих кружностью через станции Тихорецкая и Краснодар – Сорт.

Выделение вагонопотоков для переключения может осуществляться на основе прогноза системы АС ПРО-ГРЕСС в части прогнозной мощности вагонопотока по каждому назначению, формируемому станцией.

Развитием данной задачи должно являться расширение блока предлагаемых решений, как в части корректировки существующих назначений, так и разработке методов оценки и адаптивной оптимизации плана формирования поездов на выделенном железнодорожном полигоне на основе технико-экономических критериев и анализа эксплуатационной обстановки.

Возвращаясь к примеру с полигоном доставки грузов в адрес морских терминалов – для формирования автоматизированных рекомендаций, одним из возможных вариантов решений является использование прогноза наличия грузов на морских терминалах, а также данных о текущей эксплуатационной обстановке.

В качестве мер, предлагаемых системой, можно рассматривать:

1. Ускорение подачи и обработки на припортовых станциях и в портах:

Мероприятия данного типа используются как в ближнем, так и в дальнем подходе. Станция Разъезд 9 км должна обеспечивать формирование назначений в адрес припортовых станций с учетом уточненного заказа на подвод потоков, исходя из потребностей морских терминалов.

Станция Батайск, работая на дальнем подходе, должна формировать назначения с использованием заказа на подвод потоков, снижая время накопления на станции Разъезд 9 км в следующие сутки, и учитывая ограничения в возможности отправления поездов на участок Батайск – Тимашевская.

2. Отставление от движения невостребованного груза

Данные мероприятия должны реализовываться в дальнем подходе и использовать возможности направ-

ления Батайск – Тихорецкая – Краснодар-Сорт по размещению вагонов с невостребованной на текущий момент номенклатурой груза. В связи с недостаточным путевым развитием на станции Краснодар-Сорт, формирование поездов, для последующей временной отставки от движения должно осуществляться на станциях Батайск и Тихорецкая, с целью дальнейшего продвижения до станции Краснодар-Сорт. Формирование таких назначений должно происходить в соответствии с анализом наличия грузов на припортовых станциях. Вагоны с грузами, наличие которых близко к нормальному или превышает его на небольшой процент, должны следовать в сквозном кружном назначении до станции Краснодар-Сорт, вагонопотоки с грузами, находящимися в избытке, должны либо отставляться от движения на участке Батайск – Тихорецкая, либо следовать с переработкой по станции Тихорецкая, с последующим включением в назначение Краснодар-Сорт.

3. Организация судовой партии

Мероприятия по формированию составов в соответствии с судовой партией относятся к ближнему подходу и реализуются на путях станции Разъезд 9 км. На основе уточненного сводного заказа, станция должна осуществлять формирование соответствующих составу судовой партии назначений для снижения времени обработки на припортовых станциях.

Таким образом, развитие Автоматизированной системы организации вагонопотоков должно обеспечить эффективную технологию ведения и использования плана формирования грузовых поездов с использованием средств автоматизированной поддержки принятия решений на основе анализа оперативных и прогнозных изменений эксплуатационной обстановки и возможностей инфраструктуры.

Литература

1. Инструктивные указания по организации вагонопотоков на железных дорогах ОАО «РЖД», 2006 – 527 с.
2. Бородин А.Ф. Технологическое обеспечение перевозочного процесса. – Железнодорожный транспорт, 2013. - № 3. – С. 33 – 36.

**Матюхин В.Г., Шабунин А.Б.,
Ефремов Г.А., Ефремова А.П., Тимченко А.Д.,** ОАО «НИИАС», г. Москва

Когнитивные технологии в проектах автоматизации диспетчерского управления на железнодорожном транспорте

Введение

Усложняющиеся технологические процессы на железной дороге, повышение автоматизации процессов требует нового подхода к проектированию системы, который сфокусирован не только на технологиях, но также учитывает человека как важный элемент человеко-машинной системы.

Кроме того, одним из результатов исследования удобства использования системой является экономический фактор: более удобная система снижает затраты на обучение и уменьшает вероятность значительных переделок системы на этапе внедрения.

Помимо этого в сложных транспортных системах (железнодорожных, авиационных) выделен целый класс ошибок экипажа и диспетчеров из-за чрезмерных физических воздействий и психоэмоциональных нагрузок, эргономических недостатков техники [1, 2]. В этой связи стала очевидной необходимость внедрения системы поддержки принятия решений, включающей комплекс организационно-методических, научно-исследовательских, проектировочных и экспертных работ, направленных на учет физиологических, антропометрических и психологических характеристик и свойств человека на всех этапах разработки, создания и эксплуатации [2].

В существующих системах использован машиноцентрический подход при создании сложных технических систем. Данный подход исходит из постулата, что машина все может, а из-за ограниченных психофизиологических возможностей человека не достигается ожидаемая эффективность и снижается безопасность. В русле машиноцентрического подхода главная задача наук о человеке виделась в приспособлении человека к диспетчерскому управлению путем медицинского и психологического отбора, повышения возможностей за счет соответствующих тренировок и специальной подготовки, профилактики развития и коррекции неблагоприятных функциональных состояний [2].

В настоящее время ОАО «РЖД» уделяет большое внимание внедрению интеллектуальных автоматизированных систем [3-6]. Применение мультиагентных технологий позволяет решать сложные задачи оптимизированной корректировки расписания движения в реальном времени (порядка 5-10 секунд). Это дает возможность диспетчерам разного уровня получать и сравнивать разные варианты предлагаемых расписа-

ний. Для быстрого анализа предлагаемых расписаний и принятия решения необходимы новые пользовательские интерфейсы. Но ответственность за принятие каких-либо действий остается за диспетчерским персоналом. Проблеме представления результатов интеллектуальных вычислений лицу, принимающему решение (диспетчеру), не уделено достаточного внимания.

Все вышеперечисленное подтверждает актуальность задачи представления необходимой информации для диспетчерского персонала ОАО «РЖД» в доступной и наглядной форме. Для снижения количества ошибок из-за несовершенства языка общения между техническими средствами и человеком, для увеличения объема воспринимаемой информации, а также для быстрого анализа решений, разработанных интеллектуальными системами, предложено использовать когнитивные технологии при разработке пользовательских интерфейсов.

Основные принципы использования когнитивных технологий при проектировании интерфейсов

Основные когнитивные процессы, происходящие в работе диспетчера—это прогнозирование и принятие решений по управляющим воздействиям в условиях неполноты информации и временных ограничениях. Доступная на момент принятия решений информация может быть неполной, сложной или противоречивой. Эти факторы приводят к тому, что есть потребность в анализе этой информации со стороны СППР и предоставлении её в понятном и непротиворечивом виде.

В настоящее время диспетчерский персонал получает информацию из разнородных автоматизированных систем, в которых информация представлена по-разному. Различные интерфейсные решения вызывают трудности восприятия информации и требуют больше времени для привыкания. У пользователей формируется доверие к системе только тогда, когда она ведет себя предсказуемо и предлагает компетентные решения.

Основные принципы построения когнитивных интерфейсов, используемые в работе:

- антропоцентрический подход,
- информационная архитектура,
- модульность пользовательского интерфейса.

При разработке интерфейса с позиций антропо-

центрического подхода человек рассматривается не как специфическое звено технической системы, а как субъект труда, осуществляющий сознательную, целенаправленную деятельность, используя в ходе ее реализации технические устройства для достижения поставленной цели в конкретных условиях среды обитания. Таким образом, условия обитаемости и технические устройства включены в деятельность человека. В этой связи исследование и проектирование деятельности определяются в качестве главной задачи. Для этого используются следующие шаги проектирования деятельности:

- ♦ описать события, на которые необходимо реагировать,
- ♦ для каждого из событий описать,
 - возможные эффекты от его действия;
 - критерии, по которым можно обнаружить, что событие произошло;
 - необходимые взаимодействия между оператором и системой;
 - результат, ожидаемый от действий системы.
- ♦ декомпозировать действия системы на задачи, исходя из взаимодействия человек-машина.

Для создания удобного интерфейса используется структурирование выводимой информации в диспетчерском приложении и проектирование информационного пространства автоматизированного рабочего места, способствующее выполнению задач и интуитивному доступу содержимому.

Элементы диспетчерского АРМ разделены на модули, исходя из выполняемых задач. При этом для разных диспетчерских ролей общие элементы выполнены в едином стиле, что упрощает обучение пользователей новой системе и упрощает понимание реакции системы на пользовательские воздействия.

Примеры разработанных решений

Когда диспетчер принимает решение взять ручное управление над ситуацией, то ему не обязательно знать тонкости всех алгоритмов работы, которые используются в СППР, но ему необходимо знать текущее состояние и какие критерии использует СППР в своей работе.

Таким образом, зная общие принципы поведения системы и набор predetermined параметров, доступных для изменения, диспетчер может влиять на решение, предлагаемое системой, и получать ожидаемый результат.

В рамках работ по созданию интерфейсов для диспетчеров Центра по управлению тяговыми ресурсами (ЦУТР) с использованием когнитивных технологий нами предложены следующие решения в части мнемонической схемы железнодорожного полигона.



Рис.1. Знак станции

Знак железнодорожной станции состоит из следующих логических частей: ядро станции, секции на приём и отправление.

В ядре станции содержится информация:

- об оперативном резерве (в случае простоя более установленной нормы ячейка подкрашивается),
- количество отставленных от движения транзитных грузовых поездов,
- количество вагонов рабочего парка и простой транзитных вагонов без переработки.

В секции на прибытие отображена информация о:

- количестве грузовых поездов, прибывших с начала суток, с разделением на транзитные и в расформирование,
- количестве локомотивов, следующих в ремонт; количестве сходов локомотивов с кольца и наличии локомотивов в узле с «красным» и «желтым» пробегом,
- количестве локомотивных бригад, работающих 2 ночи подряд; количестве бригад, готовых к работе с оборота и количестве бригад, прибывших в узел с нарушением режима с начала суток.

В секции на отправление:

- всего грузовых с начала суток, а также количество поездов, готовящихся к отправлению и количество поездов, необеспеченных тяговыми ресурсами;
- количество локомотивов резервом с учетом отклонения от выданных регулировочных заданий;
- количество локомотивов в узле в ожидании работы более 4 часов;
- факт заставки бригад на трехчасовой интервал;
- количество бригад на отдыхе, готовых к работе.

Для интегральной оценки дорожной ситуации разработан ряд агрегированных показателей по ключевым станциям диспетчерских участков, находящихся под контролем ЦУТР. Приведем описание некоторых из них.

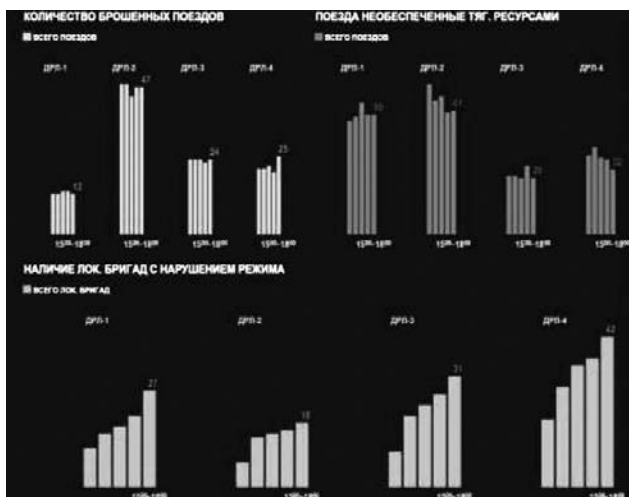


Рис.2. Агрегированные показатели для старшего локомотивного диспетчера

Агрегированные показатели

Для старшего локомотивного диспетчера с учетом технологии работы созданы следующие показатели (см. рис. 2):

- количество брошенных поездов по участкам локомотивных диспетчеров по трёхчасовым интервалам;
- количество поездов, необеспеченных тяговыми ресурсами по трёхчасовым интервалам;
- количество бригад, следующих с нарушением режима.

Для сменного инженера дирекции тяги (см. рис.3):

- дислокация локомотивов на дорогах полигона (с разделением на эксплуатируемый и неэксплуатируемый парк);
- заставка локомотивных бригад по депо (плановая и фактическая).

Заключение

Использование когнитивных технологий позволило разработать набор унифицированных интерфейсных решений, с помощью которых осуществляется деятельность диспетчера и руководящего персонала с системой поддержки принятия решений с учетом компетенций каждого из них. При этом интуитивно понятное представление информации и разработанных показателей снижает фактор ошибки в принятии

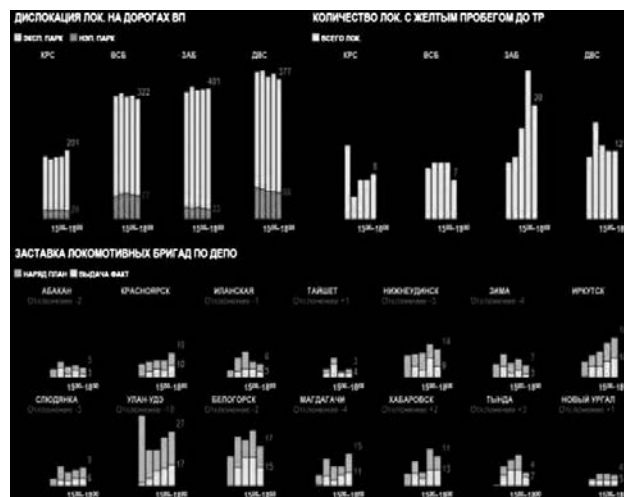


Рис.3. Агрегированные показатели для сменного инженера дирекции Тяги

решения и снижает время, необходимое на принятие предложенного решения и оценку последствий.

Литература

1. Платонов Г.А. Эргономика на железнодорожном транспорте. – М.: Транспорт, 1986.
2. Чунтул А.В. Эргономист, №30. – 2013г. – С. 9-25.
3. Матюхин В.Г., Шаров В.А., Шабунин А.Б. Управление железной дорогой онлайн/ Пульт управления, 2011. № 03. – С.24-29.
4. Матюхин В.Г., Шабунин А.Б., Калущкая А.П. Дороги проверят / Пульт управления, 2012. № 05(09). – С.24-27.
5. Ефремов Г.А., Калущкая А.П. Интеллектуальное диспетчерское управление движением поездов на направлении Санкт-Петербург – Москва// Сборник трудов Первой научно-технической конференции «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте» (ИСУЖТ-2012, Москва, 15-16 ноября 2012г). – М. – Изд-во ОАО «НИИАС», 2012. – С. 55-57.
6. Матюхин В.Г., Шабунин А.Б., Калущкая А.П. От продуманного решения к качественной реализации / Железнодорожный транспорт, 2013. №3. – С.20-22.
7. Шабунин А.Б., Ефремов Г.А., Калущкая А.П. Использование мультиагентных систем в диспетчерском регулировании / Железнодорожный транспорт, 2013. №3. – С.23-27.

СЕКЦИЯ №2

КОМПЬЮТЕРНОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТНЫХ ПРОЦЕССОВ И СИСТЕМ, МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕВОЗОЧНОГО ПРОЦЕССА И ТРАНСПОРТНОЙ ЛОГИСТИКИ

Мороз А. И., *Институт проблем транспорта РАН, г. Москва*

Логико-динамическая модель и проблема разработки Интеллектуальной системы управления железнодорожным транспортом

В докладе представлена модель, которая описывает динамику транспорта на железнодорожной сети, и обсуждается её отношение к проблеме разработки интеллектуальной системы управления железнодорожным транспортом. При этом под интеллектуальной понимается такая техническая или программная система, в которой, во-первых, решаются задачи управления, которые человек или группа людей либо вообще не способны их решать, либо не способны решать в реальное время, и, во-вторых, вырабатываются такие управления, которые более эффективны, чем управления, вырабатываемые людьми, в частности, являются оптимальными по заданному критерию оптимальности. В железнодорожной компании такими задачами, в частности, являются (1) управление движением транспорта на всей сети и разработка оптимальных маршрутов и графиков движения по ним [1]; (2) управление функционированием компании средствами динамического финансового планирования, которая называется проблемой бюджетирования; (3) управление взаимодействием компании с другими секторами экономики страны. В докладе рассматривается только первая задача.

В процессе разработки логико-динамической модели в [2, 3] использовалась плодотворная идея, изложенная в монографии [4], рассматривать положение движущихся поездов на сети не в каждый момент времени, а в течение периода, когда они находятся на одном и том же блок-участке. В этом случае движение поездов рассматривается как изменение их дислокаций в дискретном времени.

При решении проблем управления должны быть определены вводимая в управляющий орган информа-

ция, множество значений, которые могут принимать средства управления, и задан алгоритм получения конкретных значений средств управления, соответствующих конкретным вводимым данным. В качестве входной информации железнодорожной системы управления рассматривается поездная обстановка на всех железнодорожных ветках и на станциях. А именно, рассматривается дислокация поездов на всех ветках сети, называемая В-дислокацией, и распределение поездов в очередях на отправлении на всех станциях сети, называемое S-дислокацией. Средствами управления являются сигналы светофоров и команды на приём и отправление поездов со станций.

Если обозначить В-дислокацию в k -м цикле как $Z(k)$, S-дислокацию как $G(k)$, действие управлений как $u(k)$ и алгоритм управления как $H(Z(k), G(k))$, то теоретическое представление управляемой системы в дискретном времени имеет вид

$$u(k) = H(Z(k), G(k)),$$

$$(Z(k+1), G(k+1)) = F(Z(k), G(k), u(k)).$$

Тогда при рассмотрении движения транспорта на железнодорожной сети задача состоит в описании, что представляют собой $Z(k)$ и $G(k)$, идентификации отображения F и синтезе алгоритма H .

1. Модель процессов для сети в форме декомпозиции

Для описания процессов на железнодорожной сети, когда всей системой управляет один орган, модель в форме логико-динамической программной системы разработана в [2]. В качестве компьютерной программы она управляет всеми светофорами на сети и управ-

ляет приёмом и отправлением поездов на всех станциях. В настоящем докладе железнодорожная система рассматривается как декомпозиция на определённое число регионов и в каждом регионе полномочия его органа управления распространяются только на ветки и станции своего региона. При этом, маршруты движения поездов могут проходить через несколько регионов. В этом случае возникают задачи со многими органами управления и разными законами функционирования в разных регионах. В частности, возникает задача согласования действий органов управления регионов, когда управление поездами переходит от одной системы управления к другой, т.е. задача описания их взаимодействий. Это взаимодействие происходит в форме обмена поездами и обмена информацией. В этом случае программная ИСУ будет представлять собой систему, которая состоит из определённого числа взаимодействующих подсистем управления.

При разработке теории для этого случая потребовалось введение понятий межрегиональной ветки, виртуальной станции и матрицы соответствий.

Пусть регионы пронумерованы и s -й обозначается как R^s . Число блок-участков на ветке $[p,j]$, соединяющей станции S^p и S^j , где $S^i \in R^s$, обозначается как $n_{bu}(s,p,j)$.

Обмен поездами происходит через ветки, граничные станции которых принадлежат разным регионам. Такие ветки будем называть *межрегионными*.

Так как граничные станции межрегионных веток взаимодействуют между собой, то в моделях каждого региона обе должны быть отнесены к каждому из них. Но для каждого региона одна из этих станций ему не принадлежит и на неё не распространяются полномочия его органа управления. Поэтому в этом регионе эта станция будет называться *виртуальной*. Динамика состояний межрегионной ветки зависит от органа управления принимаемой станции, поэтому эта динамика определяется моделью того региона, для которого она является входящей.

Реальные станции каждого региона будем называть *г-станциями*, а его виртуальные станции – *в-станциями*. Таким образом, каждый регион характеризуется множествами *г-станций* и *в-станций*.

В-дислокация на ветке $[p,j]$, соединяющей станции S^p и S^j , в текущем временном цикле формализуется пятимерной матрицей $Z_0(s,p,j,t,m)$, где s – номер региона, m – номер блок-участка. Событие {в s -м регионе на m -м блок-участке ветки $[p,j]$ нет поезда} кодируется как $Z_0(s,p,j,1,m)=0$, $Z_0(s,p,j,2,m)=0$, $Z_0(s,p,j,3,m)=0$. Событие {в s -м регионе на m -м блок-участке ветки $[p,j]$ находится штатный поезд, движущийся по маршруту с номером nM } кодируется как $Z_0(s,p,j,1,m)=1$, $Z_0(s,p,j,2,m)=nM$, $Z_0(s,p,j,3,m)=0$. Событие {в s -м регионе на m -м блок-участке ветки $[p,j]$ находится внештат-

ный поезд с приоритетом $PR \geq 1$, движущийся по маршруту с номером nM } кодируется как $Z_0(s,p,j,1,m)=-1$, $Z_0(s,p,j,2,m)=nM$, $Z_0(s,p,j,3,m)=PR$.

В-дислокация в следующем $(k+1)$ -м цикле формализуется аналогично матрицей $Z(s,p,j,n,m)$.

$$Z(s,p,j,n,m) = \alpha(q(s,p,j,m))Z_0(s,p,j,n,m-1) + (1-\alpha(q(s,p,j,m)))Z_0(s,p,j,n,m), \quad (1)$$

где $\alpha(r) = 0$ при $r \leq 0$ и $\alpha(r) = 1$ при $r > 0$ и $q(s,p,j,m)$ – значение сигналов светофоров.

S-дислокация, т.е. распределение поездов в очередях на отправление с S^j на ветку $[j,L]$ с заданными временами их отправления, формализуется матрицей $G(s,j,L,r,m)$, где s – номер региона, $r = 1, 2, 3$ и m – номер позиции в очереди на эту ветку. Событие {в s -м регионе очередь на отправление поездов со станции S^j на ветку $[j,L]$ отсутствует} кодируется как $G(s,j,L,1,m)=10^n$, $G(s,j,L,2,m)=0$, $G(s,j,L,3,m)=-1$ для всех m , где число 10^n значительно больше времён отправления всех поездов. Событие {в s -м регионе в очереди на отправление со станции S^j на ветку $[j,L]$ на m -й позиции стоит штатный поезд с временем отправления T и движущийся по маршруту с номером nM } кодируется как $G(s,j,L,1,m)=T$, $G(s,j,L,2,m) = nM$, $G(s,j,L,3,m)=0$. Событие {в s -м регионе в очереди на отправление на ветку $[j,L]$ на m -й позиции стоит внештатный поезд с приоритетом $PR \geq 1$, временем отправления T и движущийся по маршруту nM } кодируется как $G(s,j,L,1,m)=T$, $G(s,j,L,2,m)=nM$, $G(s,j,L,3,m)= PR$.

Значения $q(s,p,j,m)$ сигналов светофоров на входах блок-участков и на входах станций определяются следующим образом. Красному сигналу на входе m -го блок-участка ветки $[p,j]$ s -го региона соответствует $q(s,p,j,m) = 0$, желтому соответствует $q(s,p,j,m) = 1$ и зелёному соответствует $q(s,p,j,m) = 2$. Алгоритм их задания должен обеспечить выполнение следующих требований: (1) на любом блок-участке должно быть не более одного поезда и (2) продвижение поездов по ветке должно быть наиболее быстрым. В [2] показано, что если допускается наличие движущихся поездов на смежных блок-участках, то на железнодорожных ветках $q(s,p,j,m)$ определяются по следующей рекуррентной формуле:

$$q(s,p,j,n_{bu}(s,p,j)+1) = u(s,p,j), \\ q(s,p,j,m) = \alpha(q(s,p,j,m+1)) \cdot [Z_0(s,p,j,1,m)] + 1, \quad (2)$$

$$m = n_{bu}(s,p,j), n_{bu}(s,p,j-1), \dots, 1,$$

где $u(s,p,j)$ задаёт орган управления станции S^j s -го региона при приёме поездов с ветки $[p,j]$.

Далее, средством управления является задание позиций принимаемых на станции поездов в очередях на отправление и задание им времён отправления. Это за-

дание, а также команды на отправление поездов, приводят к перестройке этих очередей. Алгоритм задания указанных позиций и перестройки очередей разработан в [2]. Он назван *G-алгоритмом*. Последний обеспечивает выполнение следующих требований: (1) в очереди на каждую ветку не должно быть двух поездов с одним и тем же временем отправления; (2) график отправления штатных поездов не должен быть нарушен, т.е. они должны быть отправлены точно в своё время; (3) время отправления внештатных поездов является минимально возможным и они должны стоять в очереди согласно их приоритетам.

Модель взаимодействия регионов разработана в [3].

Так как закон динамики каждого региона описывается в переменных его модели, то в процессе взаимодействия необходимо выполнять преобразование переменных одного региона в соответствующие переменные другого региона.

Для этого вводятся дополнительные элементы модели, называемые *матрицами соответствий*. В [3] эти матрицы определяются и описан алгоритм вышеуказанного преобразования переменных. А именно, для каждого региона R^s и для каждой его межрегионной ветки по матрице соответствий определяется номер региона, из которого она исходит, и идентификатор этой ветки в переменных этого региона.

Укрупнённая схема алгоритма моделирования динамики транспорта на железнодорожной сети изображена на Рис. 1. На ней показано, как преобразуется состояние сети (Z_0, G_0) в текущем k -м цикле в состояние (Z, G) в $(k+1)$ -м цикле.

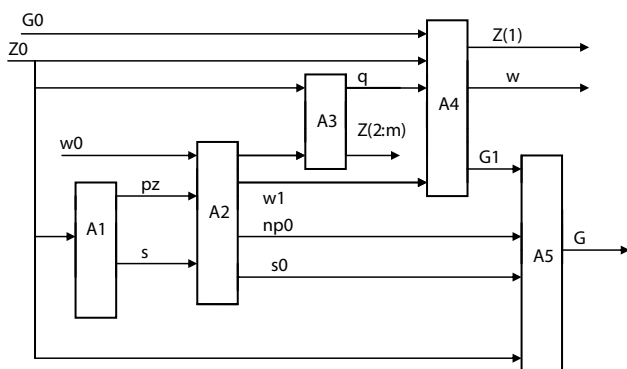


Рис. 1. Схема моделирования динамики на сети.

В блоке A1 для $j=1, \dots, ns(t)$, где $ns(t)$ – число g -станций региона R^t , определяются $s(j)$ – количества поездов, находящихся на входных ветках станций S^j , и двумерный массив pz – номеров этих веток.

В блоке A2 определяется $s_0(j)$ – количество поездов, которые принимаются на S^j , и двумерный массив np_0 упорядоченных по времени отправления этих поездов с S^j , $j=1, \dots, ns$. Также определяются значения сигналов светофоров $u(j)$ на входах станции S^j . При приёме по-

ездов изменяется число поездов на станции S^j , что регистрируется в выходе w_1 блока A2.

В блоке A3 моделируется динамика дислокаций согласно уравнению (1). А именно, определяются значения сигналов светофоров q на всех ветках сети и дислокации поездов $Z(2:m)$ на всех блок-участках, кроме первого. Входом этого блока являются текущие значения Z_0 дислокаций и значения $u(t,p,j, nbu(s,p,j)+1)$ сигналов светофоров на входах станций.

В блоке A4 определяется изменение состояния сети в результате отправления поездов со станций. Здесь вычисляются неопределённые в блоке A3 состояния первых блок-участков всех веток и они регистрируются в выходе $Z(1)$. В связи с отправлением поездов определяется их новое число w на станциях и определяются пятимерные массивы G_1 , в которых отражены изменения в очередях.

Блок A5 содержит алгоритм преобразования очередей на отправление на станциях в результате приёма поездов. Входом блока являются массивы G_1 , np_0 , s_0 и Z_0 . Информация о Z_0 требуется, чтобы установить, является ли принимаемый поезд штатным или внештатным, так как соответствующие им алгоритмы преобразования очередей различны.

2. Интервальное регулирование и модификация алгоритма управления

В современных системах управления движением поездов используются системы интервального регулирования. Они обеспечивают безаварийное движение на железнодорожных ветках. При их использовании реализуются такие В-дислокации, что между поездами всегда имеется по меньшей мере один свободный блок-участок. Если сигналы светофоров задаются согласно алгоритму (2), то может оказаться, что на каких-то смежных блок-участках будут находиться движущиеся поезда. Это значит, что этот алгоритм не удовлетворяет требованию системы интервального регулирования.

Далее представлен один возможный алгоритм задания значений сигналов светофоров $q(s,p,j,m)$, который удовлетворяет требованию указанной системы, а именно требованию, чтобы между поездами на ветке имелся по меньшей мере один свободный блок-участок.

Пусть фиксирована ветка $[p,j]$. Если на последнем, т.е. на $nbu(s,p,j)$ -м блок-участке нет поезда, то допускается перемещение всех поездов на один блок-участок по ходу движения. Формально это задаётся следующим образом. Если $z(s,p,j,l, nbu(s,p,j)) = 0$, то задаётся $q(s,p,j,m) = 1$ для $m=1, 2, \dots, spj$. Если же на нём есть поезд и при этом ему открыт доступ на станцию, т.е. вы-

полняется $|z(s,p,j,1,nbu(s,p,j))| = 1$ и $q(s,p,j,nbu(s,p,j)+1) > 0$, то также задаётся $q(s,p,j,m) = 1$ для всех m .

Если на $nbu(s,p,j)$ -м блок-участке есть поезд и при этом доступ на станцию ему закрыт, т.е. выполняется $q(s,p,j,nbu(s,p,j)+1) = 0$, то следует найти интервал из двух или более свободных блок-участков с наибольшим номером блок-участков и допустить перемещение поездов, движущихся перед ним, на один блок-участок, а остальным поездам закрыть движение. Формально следует найти такой максимальный $m_0 > 1$, что $z(s,p,j,1,m_0) = 0$ и $z(s,p,j,1,m_0-1) = 0$ (последнее означает, что на m_0 -м и на (m_0-1) -м блок-участках нет поездов). Если такой m_0 не существует, то полагается $q(s,p,j,m) = 0$ для всех m . Если же такой m_0 существует, то полагается $q(s,p,j,m) = 1$ для $m = 1, 2, \dots, m_0-1$ и $q(s,p,j,m) = 0$ для $m=m_0, m_0+1, \dots, nbu(s,p,j)$.

Для выполнения вышеуказанного требования на дислокации также требуется модификация общего алгоритма формирования команд на отправление поездов со станций. А именно, следует дополнить общий алгоритм следующим фрагментом. Если все условия для отправления поезда на ветку $[j,L]$ выполнены и если на первом блок-участке этой ветки есть поезд, то поезд на этот блок-участок не отправляется и состояние на нём определяется только динамикой на этой ветке. Если же на указанном блок-участке нет поезда, а на втором блок-участке есть поезд и значение сигнала светофора на входе третьего блок-участка равно нулю, то поезд на первый блок-участок не отправляется и состояния первого и второго блок-участков определяют динамикой на ветке $[j,L]$.

Этим алгоритм определения требуемых значений $q(s,p,j,m)$ определён. Далее он назван Q-алгоритмом.

3. Укрупнённая схема расчёта графиков движения грузовых поездов

Расчёт оптимальных маршрутов для грузовых поездов и графиков их движения согласно Q-алгоритму и G-алгоритму производится на компьютере следующим образом.

- (1) Задаётся начальная поездная обстановка $Z_0(s,p,j,r,m)$ на железнодорожных ветках и $G_0(s,j,L,r,m)$ на станциях.
- (2) Фиксируется поезд, для которого разыскивается маршрут, и задаются начальная и конечная станции.
- (3) Задаётся конечный набор возможных маршрутов для этого поезда.
- (4) Задаётся критерий эффективности маршрутов.
- (5) Для каждого из вышеуказанных маршрутов выполняется на компьютере программа, воспроизводящая согласно Q-алгоритму и G-алгоритму дви-

жение всех поездов на сети из заданной начальной поездной обстановки, и подсчитывается значение критерия эффективности. Определяется маршрут, для которого этот критерий достигает экстремум.

- (6) Регистрируются моменты времени, когда поезд, движущийся по оптимальному маршруту, отправляется со станций этого маршрута. Последовательность этих моментов времени является графиком движения, который требовалось разработать.
- (7) Этот поезд переводится в разряд штатных поездов, т.е. движущихся по определённому временному графику.

4. Вычислительный эксперимент

Описанная выше процедура иллюстрируется следующим вычислительным экспериментом. Рассмотрим модельную железнодорожную сеть с тремя регионами, которая изображена на рис. 2.

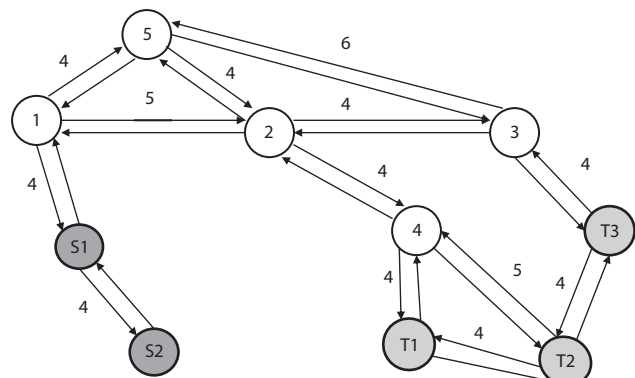


Рис.2. Сеть с тремя железнодорожными регионами

В этой сети матрицы соответствий следующие:

$$Nv(1,r,n) = \begin{bmatrix} 61 & 74 & 84 & 93 \\ 20 & 30 & 30 & 30 \\ 13 & 14 & 24 & 35 \end{bmatrix},$$

$$Nv(2,r,n) = \begin{bmatrix} 3 & 1 & 4 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 6 & 4 & 6 \end{bmatrix},$$

$$Nv(3,r,n) = \begin{bmatrix} 41 & 42 & 53 \\ 10 & 10 & 10 \\ 47 & 48 & 39 \end{bmatrix}.$$

В глобальной нумерации станций, изображенных на Рис.2, круги, которые обозначены только цифрами – это станции региона R^1 , станции $S1$ и $S2$ принадлежат региону R^2 и станции $T1, T2$ и $T3$ принадлежат региону R^3 . Например, в локальной нумерации региона R^1

виртуальная станция S1 имеет номер 6, виртуальная станция T1 – номер 7, T2 – номер 8 и T3 – номер 9. В локальной нумерации региона R³ виртуальная станция 4 имеет номер 4, виртуальная станция 3 имеет номер 5. Цифры над стрелками указывают число блок-участков на соответствующей ветке.

На этой сети движутся 5 штатных и 26 внештатных поездов. Их маршруты заданы как последовательности номеров станций, которые они должны проходить. Пусть требуется провести грузовой поезд, которому присвоены номер 20 и показатель приоритета 2, из станции S2 региона R² до станции T3 региона R³.

Возможные маршруты приведены в Таблице 1.

Таблица 1

Маршруты	В глобальной кодировке	В локальной кодировке	Количество блок-участков	Время прибытия
A	S2-S1-1-5-3-T3	2-1-3-5-3-9	22	34
B	S2-S1-1-2-3-T3	2-1-3-2-3-9	21	54
C	S2-S1-1-2-4-T2-T3	2-1-3-2-4-8-3	29	44

Задана начальная поездная обстановка. Пусть критерием эффективности является время прибытия поезда на станцию назначения T3. Воспроизведение на компьютере динамики всей системы, где управления формируются согласно Q-алгоритму и G-алгоритму, даёт результат, который приведён в последнем столбце Таблицы 1. Как можно видеть, оптимальным является маршрут A. Также можно видеть, что хотя маршрут B является самым коротким по числу блок-участков, время, которое затрачивается на его прохождение, оказывается самым большим, что является результатом взаимодействия с движением других поездов.

Далее найдём временной график движения этого поезда. Время отправления поезда со станции – это номер цикла, в котором он оказывается на первом блок-участке ветки, исходящей с этой станции. Для поезда nM=20 и варианта A получаем следующую Таблицу 2 состояний блок-участков исходящих веток.

Таблица 2

k = 2, [S2,S1]	k = 7, [S1, 1]	k = 13, [1,5]	k = 23, [5, 3]	k = 30, [3,T3]
-1 0 0 0	-1 0 0 -1	-1 0 -1 0	-1 0 -1 0 -1 0	-1 0 0 0
20 0 0 0	20 0 0 19	20 0 21 0	20 0 24 0 23 0	20 0 0 0
2 0 0 0	2 0 0 4	2 0 1 0	2 0 4 0 3 0	2 0 0 0

Таким образом, временной график движения этого поезда следующий:

Таблица 3

Станции	S2	S1	1	5	3
Время отправления	2	7	13	23	30

Логико-динамическая модель позволяет решать (1) задачу прогнозирования поездной обстановки на железнодорожных ветках и на станциях (прогноз необходим, в частности, для предотвращения заторов посредством задержания отправления поездов с низким приоритетом и обеспечения прохождения станций поездов с более высоким приоритетом, как это продемонстрировано на вычислительном эксперименте в [2]), (2) задачу разработки рациональных маршрутов грузовых поездов, например, удовлетворяющих критерию ресурсосбережения, и разработки временных графиков их движения, (3) задачу выявления возможных нарушений графиков движения поездов в случае, когда на каких-то станциях отправляются новые поезда, (4) задачу обоснования строительства новых станций и железнодорожных веток, (5) задачу разработки графиков движения всех поездов. Состав и трудность решаемых с использованием логико-динамической модели задач позволяет рассматривать её как методическую основу при разработке интеллектуальной системы управления железнодорожным транспортом.

Литература

1. Шаров В.А. Интеллектуальные системы управления в производственной деятельности ОАО «РЖД». Труды Второй научно-технической конференции “Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте ИСУЖТ-2013”, 21-22 октября 2013 г., Москва: НИИАС. <http://www.vniias.ru/>
2. Мороз А.И. Динамика на железнодорожной сети с различающимися по приоритетам внештатными поездами // ТРАНСПОРТ: наука, техника, управление. 2013, № 9.
3. Мороз А.И. Логико-динамическая модель как методическая основа разработки интеллектуальной системы управления железнодорожным транспортом // ТРАНСПОРТ: наука, техника, управление. 2014, № 9.
4. Доенин В.В. Логико-разностные модели транспортных процессов. М: Спутник, 2008.

Захарчук О.Т., ООО «АСис Софт», г. Москва

Фундаментальная модель описания организационно-технических систем

Введение

В настоящее время корпоративные информационные системы создаются путем интеграции нескольких информационных систем. Данное состояние КИС в среде ИТ-специалистов даже получило название «зоопарк информационных систем» [1].

Проблема связана с тем, что практически все такие информационные системы построены на своих уникальных моделях, которые хорошо отражают только те виды деятельности, для автоматизации которых они предназначены.

Проблема усугубляется еще и тем, что задача создания некоторой универсальной модели для описания деятельности в профессиональных сообществах менеджеров даже не ставится.

Тем не менее, уже были публикации [2-4], в которых говорится о существовании единой модели для управления разными видами деятельности и описываются успешно работающие ИТ-решения, построенные на основе этой модели.

В настоящей статье дается описание фундаментальной модели, которая упоминается в данных публикациях.

Два подхода построения моделей деятельности

В современном менеджменте отсутствует понятие «фундаментальная» в отношении к модели, как для определенного вида деятельности, так и для деятельности в целом.

Поэтому, под фундаментальной моделью здесь мы будем понимать минимальную совокупность информационных объектов, из которых можно строить модели деятельности в организационно-технических системах для их использованием в ИТ-решениях.

Когда разрабатывается новое ИТ-решение для управления определенным видом деятельности (проект, процесс, творчество и т.п.), то, как правило, фундаментальная модель этого вида деятельности создается каждый раз заново.

При этом, фундаментальная модель строится по принципу сверху вниз и содержит информационные объекты, которые напрямую соответствуют реальным бизнес-объектам.

Больше всего это похоже на получение изображения реальности путем проекции этой реальности на экран.

В результате мы получаем фундаментальную информационную модель, с помощью которой можно хо-

рошо описывать только поведение тех типов объектов, которые были в нее включены.

Вполне понятно, что если мы захотим использовать нашу фундаментальную модель для создания моделей других объектов, то мы будем вынуждены в нее включить модель этого объекта.

Опыт показывает, что со временем фундаментальная информационная модель разрастается до таких больших размеров, что может содержать тысячи или даже десятки тысяч типов объектов [5].

Совершенно другой эффект можно получить, если мы будем описывать действительность не сверху вниз, а снизу вверх.

В этом случае это уже похоже на создание картины реальности с помощью цифровой фотографии или цифрового телевидения.

Здесь фундаментальная модель действительно содержит минимум объектов. В идеале – это всего лишь один объект. Но из этого объекта (пиксела), мы можем получить модели (изображения) разных объектов действительности.

Фундаментальная модель описания деятельности

Потребуем от фундаментальной модели деятельности объединения следующих видов деятельности: Стратегического, Проектного, Процессного, Операционного.

Практически на каждом выше указанном виде деятельности мы имеем дело непосредственно с деятельностью, результатом деятельности и коммуникациями между участниками деятельности, см. таблица 1.

Сама деятельность может быть разделена на два основных вида: творческая и типовая. На практике мы, как правило, имеем смешение этих видов деятельности.

Описание результата деятельности – это, по существу, описание жизненного цикла результата деятельности, где результат деятельности описывается своими представлениями, состояниями и поведением в зависимости от деятельности, которая над ним производится.

Результатом деятельности может быть и человек, который, например, проходит обучение. Люди и механизмы объединяются в организационно-технические системы.

В этом случае на первый план выходят коммуникации между людьми, которые также являются элементами деятельности.

Таблица 1.

Связь объектов деятельности с фундаментальной моделью деятельности

Предприятие	Творческая деятельность	Деятельность		Взаимодействие
Подразделение				
Проект				
Задача				
Действие				
Процесс	Типовая деятельность	Результат		
Дорожка				
Функция				
Свойство	Цель	Организационно-техническая система	Результат	
Состояние				
Поведение				
Этап	Жизненный цикл	Коммуникация		
Фаза				
Сообщение				
Совещание	Коммуникация		Результат	
Встреча				
Отгрузка				

Для деятельности нам удалось найти такую фундаментальную модель. Лучше всего ее назвать фундаментальной частицей, с помощью которой можно построить приемлемые для практики модели любых видов деятельности.

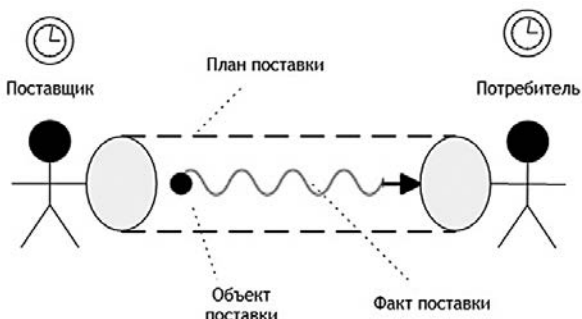


Рис. 1 Определение кванта взаимодействия

Мы назвали эту фундаментальную частицу взаимодействием или квантом взаимодействия, см. рис.1.

Любая деятельность в организационной системе состоит из взаимодействий поставщика и потребителя. Это касается как взаимодействий внутри организаций, так и взаимодействий с внешними заказчиками, поставщиками.

Квант взаимодействия может переносить не только информацию, но и материальные объекты: изделия, документы, деньги.

Сотрудник предприятия в системе также является результатом и он также может быть отправлен по определенному маршруту к месту выполнения работы.

Кроме этого, сотрудник может только временно находиться в определенном месте деятельности. Но тогда Поставщик и Потребитель в модели на рис. 1 это уже не сотрудники, а только некоторые ожидаемые места нахождения сотрудников или ожидаемые места осуществления деятельности.

Таким образом, приходим к выводу, что и движение сотрудников организации можно описать с помощью тоннелей и квантов взаимодействия. Совокупность квантов взаимодействия вокруг кванта взаимодействия-исполнителя деятельности образуют элементарный процесс или элементарное действие, см. рис. 2.

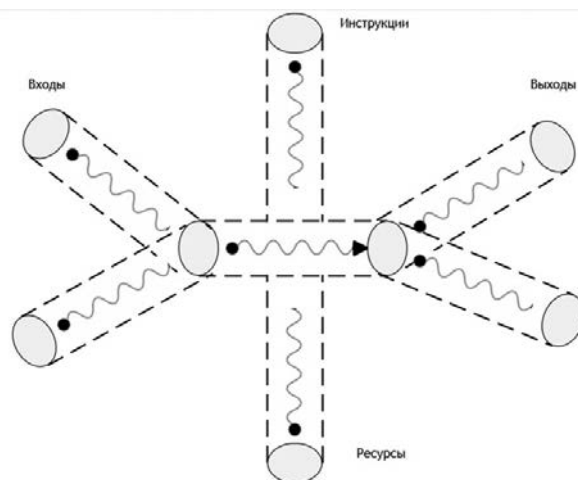


Рис. 2 Элементарный процесс, сформированный из квантов взаимодействия

Отсюда следует, что вся деятельность предприятия может быть описана с помощью квантов взаимодействия.

Литература

1. Коптелов А.к. *От описания бизнес-процессов к построению ИТ-архитектуры*// Рациональное управление предприятием. – 2009. – №5. – С.20-23.
2. Захарчук О.т. *Новый подход для автоматизации управления многоагентными организационными системами*. Высокие технологии, экономика, промышленность. Т.2, Часть 1: Сборник статей Тринадцатой международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности и экономике». 24-26 мая 2012 г. Санкт-Петербург, Россия/под ред. А.П. Кудинова. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. ISBN 978-5-7422-3440-1 - С. 47-50
3. Макухин В.М., Захарчук О.Т., Устич П.А., Иванов А.А. *Разработка новых методов моделирования, мониторинга, управления и оптимизации*

жизненных циклов перевозок, технического обслуживания и ремонта подвижного состава железнодорожного транспорта на основе единой модели. Труды и пленарные доклады участников конференции УКИ'12 /Научное издание. Электрон. текстовые дан. - М.:ИПУ РАН, 2012 - 1 электрон. опт. Диск (CD-ROM) - ISBN 978-5-91450-100-3 - С. 789-799

4. Захарчук О.т., Пятецкий В.е., Емелин А.а. *Новый подход для автоматизации управления организа-*

ционно-техническими системами. Труды Международной научно-технической конференции «Информационные технологии и математическое моделирование», Центр информационных технологий и проектирования РАН, Москва, 2012 С. 62-65.

5. Андерсон Дж., Ларокка Д. *SAP за 24 часа.*
6. Днепропетровск: Баланс Бизнес Букс, 2007. – 432 с
7. Steven Weinberg. *A Unified Physics by 2050?/ Scientific American Magazine.* December 1999.

Шапкин И.Н., Обухов А.Д., МГУПС (МИИТ), г. Москва

Вопросы интеллектуализации перевозочного процесса на железнодорожном транспорте

Железнодорожный транспорт по праву считается основной транспортной системы России. От стабильной работы железных дорог зависит благосостояние страны и укрепление международных связей [1]. При этом сама отрасль представляет собой сложно структурированный комплекс технических и технологических объектов, управление которыми в настоящее время является важной задачей для обеспечения непрерывной транспортировки грузов и пассажиров.

Примерами систем управления сложными объектами, для которых разрабатываются различные интеллектуальные модели управления, являются системы оперативно-диспетчерского управления энергосистемами, воздушным движением, речными портами [2], а также системы управления и организации железнодорожных перевозок.

Рассматриваемый объект управления представляет собой совокупность источников и пунктов погашения грузопотоков, объединенных единой сетью железных дорог, паромных переправ (Крымский федеральный округ), систем массовой переработки вагонопотоков – технических (сортировочных/участковых) станций. Источниками грузовых потоков служат: пункты погрузки на путях общего/необщего пользования, пункты перевалки с одного вида транспорта на другой, пограничные пункты, морские и речные порты. К основным элементами железнодорожной сети относятся: блок-участки, перегоны, линии и направления, включая железнодорожные станции, а также системы сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ), линии электроснабжения, системы обеспечения тяговыми ресурсами – основные и оборотные депо.

Особая роль в системе управления железнодорожными перевозками отводится техническим станциям, на которых происходит расформирование/формирование элементов транспортного потока – составов поездов. Для управления таким сложным технико-технологическим объектом диспетчерскому аппарату в режиме реального времени необходимо производить целый ряд сложнейших аналитических расчетов и трудоемких логических операций [3] с целью отыскания единственно рационального варианта продвижения поездопотока.

Возрастающая ответственность, увеличение психоэмоциональной нагрузки поездного диспетчера при принятии им оперативных и стратегических решений требуют проведения глубоких исследований в направлении развития новых управленческих способов и приемов, обеспечивающих организацию перевозок и безопасность движения на современном уровне. Для повышения эффективности оперативного диспетчерского управления требуется создание систем экспертного уровня, позволяющих передать вычислительной технике функции по обработке больших массивов входной информации от различных линейных источников (дежурных по станции, машинистов, с напольного обслуживания) и выдаче рекомендаций в режиме on-line.

Для достижения поставленных целей предлагается решить ряд задач:

1. Автоматизировать процесс принятия решений по пропуску грузовых и пассажирских поездов по отдельным элементам участка (станциям, разъездам) → участкам → направлениям в нормальном и предаварийном (отставание поезда от графика, задержка производства работ в «окно») режимах.

2. Разработать и повсеместно внедрять интеллектуальные программные комплексы, в которых реализована возможность совершенствования отдельных элементов комплекса в процессе создания и непосредственной эксплуатации на полигонах железных дорог.

При этом обязательным условием является создание современных методов и средств формирования соответствующих моделей среды управления, объектов управления, текущих ситуаций и событий, а также их детальной классификации, порождения решений по управлению, обучению способам принятия решений с учетом всей сложности структуры реальных объектов транспортной системы.

Используемые в настоящее время модели работы сортировочных станций можно объединить в следующие группы: графические, табличные, аналитические и имитационные.

Графическая модель (примитивный вариант – точный план-график) является наглядным методом, но значительным недостатком данного метода является большая трудоемкость подготовки исходной информации и особенно составление графической модели (связано с необходимостью моделирования работы станции минимум на 10-15 суток).

Аналитические методы расчетов не могут учесть всей сложности технологических линий, значительное число фаз обслуживания, не могут с достаточной точностью учесть влияние подсистем друг на друга.

Имитационные модели – современный и актуальный метод. Однако остается не полностью решенным вопрос формализации знаний.

Особый интерес представляет метод решения данной задачи с помощью нейросетевых технологий или искусственных нейронных сетей (ИНС). ИНС представляют собой вычислительные структуры, которые моделируют биологические процессы, обычно ассоциируемые с процессами человеческого мозга. Они способны решать широкий круг задач прогнозирования, оптимизации, управления сложными организационно-техническими системами. ИНС позволяют решать не формализуемые или трудно формализуемые задачи. Очень важно, что ИНС способны к адаптивному обучению по экспериментальным данным (опыту специалистов) без построения моделей, поэтому их использование особенно эффективно для сложных систем, когда математическая модель или отсутствует, или неоправданно сложна [4-6]. Разработка ИНС является одним из подходов к созданию искусственного интеллекта на транспорте.

Основные преимущества нейросетевых технологий:

1. Возможность учесть неформализуемые зависимости (за счет обучения на примерах).

2. С помощью нейросетей можно выявлять скрытые зависимости через весовые коэффициенты. Выявлять наиболее значимые зависимости.

3. Возможность решения задачи многофакторной оптимизации (решение обратной задачи при известном \min на выходе).

Таким образом, применение ИНС позволит, с одной стороны, отказаться от построения сложных и приближенных математических моделей, необходимых при традиционном использовании ЭВМ, тем более что данная проблема не всегда поддается формализации. С другой стороны, благодаря специальным методикам обучения, позволит использовать знания специалистов в данной области (обучение с учителем). После чего комплекс будет способен принимать решения в пределах этой области на уровне эксперта-профессионала.

По мере усложнения зависимости решений от ситуации использование стандартного набора алгоритмов принятия решений становится невозможным из-за проблемы размерности. В этом случае априорное решение задачи оперативного регулирования перевозочного процесса состоит главным образом в разработке модели объекта управления (промежуточной станции, станции и прилегающих к ней перегонов, участка в целом) и определяющей стратегии поиска управляющих решений на разработанной модели. В данном случае моделью является система факторов, аксиом, нормативов и правил для данного объекта управления, на основе которой формируется процесс выработки управляющей команды (воздействия), а именно то, что диспетчер знает о работе своего объекта вне зависимости от ситуационного поля.

В качестве наглядного примера аксиомы может служить утверждение о том, что после перекрытия входного сигнала на станцию грузовой поезд затратит дополнительный временной ресурс после возобновления движения и приема его на свободный станционный путь.

Остается архиважной задачей стабилизации режима управления при выходе параметров системы из установленных границ: опоздание пассажирского поезда на предыдущем диспетчерском участке с последующим вводом его в пределы нормативного графика движения; скопление грузовых поездов на станции, предшествующей сортировочной и т.п. Таким образом, задача оперативного планирования заключается в планировании действий – определении последовательности операций, которые необходимо выполнить за определенный временной интервал.

Выводы

На основе приведенных данных необходимо сформулировать вывод о том, что повсеместное внедрение инновационных методов организации перевозочного

процесса на основе нейросетевых технологий позволит увеличить производительность сортировочных систем, повысить уровень безопасности и безаварийности станционных процессов, а в конечном итоге повысить конкурентоспособность железнодорожного транспорта.

Литература

1. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года [Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 17 июня 2008 г. № 877-р].
2. Основы искусственного интеллекта: учеб. пособие / Г.Б. Бронфельд; Нижегород. гос. техн. ун-т. им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2014. – 253 с.
3. Левин Д.Ю., Толмачёв С.Н. Автоматизация работы дежурного по станции / Железнодорожный транспорт, 2013. №3. – С.56-59.
4. Круглов В.В., Борисов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика. – М.: Горячая линия – Телеком, 2001, 382 с.
5. Каллан Р. Основные концепции нейронных сетей. М.: Издательский дом «Вильямс», 2003, 288 с.
6. Ежов А.А., Шумский С.А. Нейрокомпьютинг и его применение в экономике и бизнесе. – М., 1998.

Устич П.А., Иванов А.А., Чернышова Л.М., Устич Д.П., МГУПС (МИИТ), г. Москва

Математическая модель железнодорожного транспорта как важный инструмент построения эффективной системы интеллектуального управления этой отраслью

I. Актуальность вопроса. Эффективность управления любой достаточно большой системой во многом может быть обеспечена, если имеется возможность на этапе планирования того или иного управляющего решения, направленного на изменение ее состояния, предсказать реакцию рассматриваемой системы. Особенно это необходимо при планировании реформ такой большой и сложной отрасли как железнодорожный транспорт (ЖДТ) Российской Федерации, необходимость в которых обусловлена поступательным развитием науки, техники и технологий.

Никакому обществу и никогда не избежать время от времени возникающей необходимости в проведении реформ в той или иной отрасли, если, конечно, существует осознанное стремление и воля правящей элиты этого общества к достойному выживанию и даже процветанию в современном мире.

Таким образом, можно считать, что происходящие в настоящее время реформирования ЖДТ не являются последними в его истории. Поэтому никогда не поздно осмысление этого феномена экспертным сообществом. Особенно это касается такой отрасли, как ЖДТ, которая заслуженно считается кровеносной системой экономики нашей страны. При неэффективной же работе ЖДТ под угрозой исполнение ряда других функций государства.

Реформирование такой большой, сложной технико-технологической и социально-экономической системы – это, прежде всего, принятие цепи управляющих решений, направленных на изменение не только параметров системы, но и связей в ней. При этом предсказать реакцию рассматриваемой системы на это вмешательство извне, полагаясь лишь на опыт и интуицию, невозможно, о чем свидетельствует печальный опыт реформирования других отраслей в нашей и других странах.

Следовательно, необходимо средство, позволяющее вырабатывать управляющие решения, опираясь, в основном, не на так называемый метод проб и ошибок, а на системное мышление, формализованное в виде математической модели отрасли, в данном случае – ЖДТ.

Математическая модель ЖДТ позволяет не только предсказывать его реакцию на то или иное мероприятие в рамках проведения реформы, но и подойти, что называется, вплотную к решению, пожалуй, главной проблемы транспортной науки – решению двух связанных между собой задач:

Оптимизация относительно принятого критерия параметров состояния ЖДТ, количественно характеризующих его эталонное состояние, которое, конечно же, будет соответствовать действительности только на

каком-то конечном промежутке времени, так как цены на услуги и товары не постоянны.

Разработка наиболее экономически целесообразных путей максимального приближения состояния отрасли к эталонному посредством соответствующих мероприятий в рамках реформирования ЖДТ.

Методику решения этих задач, реализуемых с помощью соответствующего программного комплекса на ЭВМ, уместно рассматривать в качестве своеобразного навигатора, позволяющего в огромном социально-экономическом и технико-технологическом пространстве с хаотически изменяющейся конъюнктурой цен на товары и услуги выстраивать подходящий «маршрут» приближения состояния ЖДТ к эталонному. Реформатор должен заранее знать значения параметров эталонного состояния отрасли, ради достижения которого, собственно, и затевается ее реформа.

II. Основные положения методики построения математической модели ЖДТ

Интересующие исследователей явления, происходящие в недрах такой огромной и сложной системы, как ЖДТ, с помощью одной единственной модели учесть и изучить невозможно. Только учет взаимодействия совокупности основных хозяйств ЖДТ позволит учитывать многообразие происходящих в нем явлений.

В связи с этим возникает необходимость в определении так называемого хозяйства-носителя, на основании модели которого целесообразно построение математической модели ЖДТ в целом. Поэтому требуется определиться: каким свойством должно обладать то или иное хозяйство ЖДТ, чтобы исполнять указанную выше роль хозяйства-носителя?

Поскольку посредством вагона выполняется финишная операция в технологии производства продукции ЖДТ, то результаты работы персонала других хозяйств транспорта отражаются на показателях использования вагонов по назначению, их надежности и безопасности. Неслучайно, что с помощью такого показателя, как оборот вагона, нередко оценивается эффективность функционирования ЖДТ в целом. Так, например, в качестве комплексного показателя эффективности реформирования ЖДТ нашей страны в предвоенные годы, начиная с 1933 года, использовался тот факт, что к 1940 году оборот вагона ЖДТ СССР оказался в два раза меньше, чем на ЖДТ США при сопоставимых территории и объемах перевозочной работы.

Итак, математическую модель вагоно-линейного хозяйства (ВЛХ), ведомого в настоящее время вагонным хозяйством (ВХ) нового образца и тремя вагоноремонтными компаниями (ВРК), целесообразно использовать в качестве упомянутого выше носителя

математической модели ЖДТ в целом. В [1] сформулированы принципы и алгоритм взаимодействия модели ВЛХ с моделями других хозяйств ЖДТ. Обосновано положение, согласно которому модель ВЛХ может служить в качестве усеченной модели ЖДТ в целом [2].

Таким образом, решение поставленной задачи следует начинать с разработки математической модели ВЛХ, для чего определимся сначала с таким понятием как «модель объекта». Под моделью объекта в общем случае следует понимать некий другой объект, который ведет себя аналогичным образом относительно цели исследования. Поэтому требуется, прежде всего, сформулировать цель исследования рассматриваемого объекта, а затем эту цель представить в виде математического выражения, которое, как известно, принято называть целевой функцией (ЦФ) рассматриваемого объекта, то есть ВЛХ.

Предъявим два следующих требования к ЦФ объекта. Она должна:

1. Отражать качество функционирования объекта на ранг выше рассматриваемого. Этим объектом в данном случае является ЖДТ.
2. Соответствовать возможностям информационной базы отрасли, то есть ЖДТ.

С помощью первого требования к ЦФ учитывается то обстоятельство, что система управления ЖДТ является многоуровневой и иерархической по своей структуре и характеру. Это позволяет планировать и осуществлять руководство ею, опираясь на дедуктивную логику, что означает следующее.

Исходя из глобальной цели ЖДТ, формируются цели для руководителей в соответствии с их положением в упомянутой многоуровневой иерархической структуре системы управления отраслью, то есть ЖДТ в целом. Аналогичное правило справедливо между ЖДТ и экономикой страны и так далее.

Относительно второго требования к целевой функции заметим, что наилучшим количественным показателем качества функционирования транспорта в целом является себестоимость единицы тонно-километровой работы. Однако существующая информационная база отрасли пока не готова к использованию указанного количественного показателя работы ЖДТ. Поэтому в качестве ЦФ допустимо на первых порах использовать себестоимость единицы пробега (СЕП) вагона, чему, впрочем, способствуют то обстоятельство, что можно при желании выйти на тонно-километровое измерение работы ЖДТ с помощью такого показателя его работы, как коэффициент порожнего (а значит, и груженого) пробега вагона.

Формула себестоимости единицы пробега вагона имеет следующий вид:

$$f(l_{ij}) = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \psi_i^{(4)} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \psi_{ij}^{(3)} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i+1} (a_{ij} l_{ij} + b_{ij} l_{ij}^2)}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i+1} l_{ij}} + \frac{\psi^{(1)} - \psi^{(2)} + \sum_k \psi_k^{(15)}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i+1} l_{ij}}, \quad (1)$$

где m_i – структура i -го ремонтного цикла вагона рассматриваемого типа [3]; n – количество ремонтных циклов за срок службы вагона; $\psi^{(1)}, \psi^{(2)}$ – покупная и ликвидная цены вагона, соответственно; $\psi_{ij}^{(3)}$ – затраты на j -й деповской ремонт (ДР) вагона в пределах i -го ремонтного цикла; $\psi_i^{(4)}$ – затраты на i -й капитальный ремонт (КР) вагона; a_{ij}, b_{ij} – параметры роста затрат на текущий ремонт (ТР), техническое обслуживание (ТО) и контроль технического состояния вагона на ПТО по мере его старения [3]; $\psi_k^{(15)}$ – годовые издержки k -го хозяйства ЖДТ (кроме ВЛХ), приведенные к одному вагону рассматриваемая типа; (l_{ij}) – матрица межремонтных пробегов, каждый элемент которой l_{ij} есть j -й межремонтный пробег вагона в пределах i -го ремонтного цикла.

Целевая функция (1) непосредственно или косвенно определена на параметрах, представленных в таблице 1. В соответствии с вышеупомянутым первым требованием к ЦФ, параметры, представленные в этой таблице, являются параметрами состояния, строго говоря, ВЛХ как усеченной модели ЖДТ в целом. Заметим, что ЦФ, как видно из формулы (1), определена, правда, косвенно, также на параметрах состояния других хозяйств ЖДТ через параметр $\psi_k^{(15)}$. Как отмечено в [4], величина этого параметра должна соответствовать оптимальным параметрам состояния k -го хозяйства ЖДТ кроме ВЛХ. Доказано, что функция многих переменных (1), которую можно представить в виде:

$$\Phi(l_{ij}, \psi^{(1)}, \psi^{(2)}, \dots, \psi^{(22)}), \quad (2)$$

имеет глобальный минимум (пояснения к доказательству приведены в [3]).

Наложив на параметры состояния ЖДТ (таблица 1) соответствующие ограничения и присоединив их к формуле (2), получена математическую модель ЖДТ. Требуется найти такие значения параметра состояния ЖДТ, при которых функция (2) принимает минимальное значение. При этом, как отмечено в [5], из списка оптимизируемых параметров следует исключить параметр безопасности вагона ($\psi^{(11)}$), протяженность гарантийного участка ПТО ($\psi^{(14)}$), риск схода вагона с рельсов ($\psi^{(19)}$), (а, стало быть, и крушения поезда), и тариф на транспортировку груза ($\psi^{(21)}$). Первые три параметра напрямую связаны с безопасностью движения, и их, следовательно, некорректно оптимизировать относи-

тельно критериев, непосредственно влияющих на глобальный экономический показатель работы отрасли.

Таблица 1.

Параметры состояния ЖДТ

№ п/п	Параметр	Обозначение
1	Покупная цена вагона рассматриваемого типа	$\psi^{(1)}$
2	Ликвидная цена вагона рассматриваемого типа	$\psi^{(2)}$
3	Норматив затрат на деповской ремонт вагона рассматриваемого типа	$\psi^{(3)}$
4	Норматив затрат на капитальный ремонт вагона рассматриваемого типа	$\psi^{(4)}$
5	Норматив затрат на текущий отцепочный ремонт (ТР) вагона	$\psi^{(5)}$
6	Удельные затраты на безотцепочный ТР, техническое обслуживание (ТО) и контроль технического состояния вагона на ПТО	$\psi^{(6)}$
7	Удельные затраты на подготовку вагона к погрузке	$\psi^{(7)}$
8	Возрастной состав парка вагонов рассматриваемого типа	$s\psi^{(8)}$
9	Мощность ремонтного хозяйства вагонов рассматриваемого типа	$\psi^{(9)}$
10	Коэффициент технологического запаса мощности ремонтного хозяйства вагонов рассматриваемого типа	$\psi^{(10)}$
11	Параметр безопасности вагона рассматриваемого типа	$\psi^{(11)}$
12	Оборот вагона рассматриваемого типа	$\psi^{(12)}$
13	Нижняя и верхняя границы доверительного интервала для параметра качества ДР вагона	$\psi_H^{(13)}, \psi_B^{(13)}$
14	Протяженность гарантийного участка ПТО вагонов	$\psi^{(14)}$
15	Годовые издержки k -го хозяйства ЖДТ (кроме ВЛХ), приведенные к одному вагону	$\psi^{(15)}$
16	Планируемый годовой объем перевозок грузов для парка вагонов рассматриваемого типа	$\psi^{(16)}$
17	Среднесуточный пробег вагона рассматриваемого типа	$\psi^{(17)}$
18	Осевая нагрузка вагона рассматриваемого типа	$\psi^{(18)}$
19	Риск схода вагона с рельсов	$\psi^{(19)}$
20	Коэффициент точности решения задачи	$\psi^{(20)}$
21	Тариф на транспортировку груза в вагоне рассматриваемого типа	$\psi^{(21)}$
22	Риск того, что интервал $[\psi_H^{(13)}, \psi_B^{(13)}]$ не покрывает фактическое значение показателя качества ДР вагона рассматриваемого типа	$\psi^{(22)}$

Параметр $\psi^{(22)}$ следует оптимизировать в рамках объекта более высокого уровня, в данном случае – в рамках экономической модели РФ.

В МИИТе на кафедре «Вагоны и вагонное хозяйство» разработаны методы оптимизации параметров $\psi^{(11)}, \psi^{(14)}$, а также получена формула для определения параметра $\psi^{(19)}$ [6].

Полученные значения этих параметров, а также $\psi^{(21)}$, следует использовать при решении оптимизационной задачи

$$\Phi(l_{ij}, \psi^{(1)}, \psi^{(2)}, \dots, \psi^{(22)}) \rightarrow \min \quad (3)$$

на правах констант. Тем самым будет обеспечено нормирование этих четырех параметров состояния ЖДТ [7].

По причинам, указанным в [1], наиболее приемлемым методом решения задачи (3) является метод динамического программирования. Однако для этого необходимо, чтобы формула (1) была аддитивной, которой она не является. Для превращения ее в таковую достаточно предварительно определить оптимальную матрицу межремонтных пробегов $[l_{ij}]$ вагона с помощью решения разработанной в МИИТе оптимизационной задачи [5]:

$$\left\{ \begin{aligned} f(l_{ij}) &\rightarrow \min; & (4) \\ l_{ij} &\leq \psi^{(11)}; & (5) \\ \left| \frac{\psi^{(9)}}{\bar{f}(l_{ij})} - \psi^{(10)} \right| &\leq \psi^{(20)}; & (6) \\ \left. \begin{aligned} \psi_i^{(13)} &\leq \frac{l_{ij}}{l_{11}} \leq \psi_A^{(13)} \quad \ddot{i} \delta \dot{e} \quad j = \overline{2, m_1}; \\ \psi_i^{(13)} &\leq \frac{l_{ij}}{l_{11}} \leq \psi_A^{(13)} \quad \ddot{i} \delta \dot{e} \quad i = \overline{2, n}, j = \overline{2, m_1}, \end{aligned} \right\} & (7) \end{aligned}$$

которая может быть использована при решении задачи (3) методом динамического программирования в качестве вспомогательной по отношению к оптимизационной задаче (3). Здесь $\bar{f}(l_{ij})$ потребность в ДР вагонов рассматриваемого типа в течение интересующего нас календарного года, методика определения которой приведена в [3].

Приведем некоторые пояснения к трем типам используемых в задаче (4)–(7) ограничений на объект оптимизации, то есть на матрицу межремонтных пробегов (l_{ij}) . Ограничение (5): любой пробег вагона между плановыми ремонтами не должен превышать значения параметра безопасности вагона (обозначенного $l_{бд}$), под которым понимается максимально допустимый пробег вагона между его глубокими диагностиками. Под глубокой диагностикой вагона понимается тот объем диагностических работ, который выполняется в рамках ДР или КР. В рассматриваемой оптимизационной задаче требуется использовать оптимальное значение параметра безопасности вагона. В качестве целевой функции в оптимизационной задаче используется формула коэффициента оперативной готовности вагона (один из комплексных показателей надежности изделия) [3]:

$$K_{ог}(l_{бд}) = \frac{\int_0^{l_{бд}} \bar{F}(y+z) dy}{\int_0^{l_{бд}} \bar{Q}(y) dy + y_1 + (y_2 - y_1) \cdot F(l_{бд}) + (y_3 - y_2) \cdot Q(l_{бд})}, \quad (8)$$

Где $F(y)$ – функция распределения (ФР) наработки вагона до появления в его конструкции опасного повреждения; $\bar{F}(y) = 1 - F(y)$; $Q(y)$ – функция рас-

пределения наработки вагона до обнаружения в нем опасного повреждения; $\bar{Q}(y) = 1 - Q(y)$; y_1 – средняя продолжительность ДР вагона плано-предупредительного характера (ДР₁); y_2 – средняя продолжительность ДР вагона плано-аварийного характера (ДР₂); y_3 – средняя продолжительность текущего ремонта вагона неплано-аварийного характера; z – продолжительность технологически необходимого времени использования вагона по назначению (оборот вагона).

Требуется найти то значение $l_{бд}$, при котором ЦФ (8) примет максимальное значение.

Однако, чтобы воспользоваться ЦФ (8), необходимо располагать технологией производства эксплуатационных данных, пригодных для идентификации ФР $F(y)$, то есть данных о наработках вагонов до появления (не обнаружения!) опасных повреждений.

Для этого следует развернуть на сети железных дорог автоматизированную систему контроля (АСК) своевременного обнаружения опасных повреждений вагонов в процессе их использования по назначению. Для развертывания на сети АСК созрела следующая необходимая совокупность условий:

- функционирует система ЦПУВ, ведомая ГВЦ ОАО «РЖД»;
- функционирует отечественная космическая навигационная система «ГЛОНАСС»;
- действует налаженная за многие десятилетия технология протоколирования так называемых узловых событий относительно технического состояния вагонов;
- субъект управления системой АСК – ревизорский аппарат на каждой дороге ЖДТ РФ.

Система АСК является системой двойного назначения:

- а) для получения эксплуатационных данных о наработках вагонов до появления в них опасных повреждений;
- б) для мониторинга качества работы буквально каждого осмотровика вагонов.

Технология мониторинга

1. Построить древовидную модель аварийности вагона, для чего следует:

- предварительно задаться завершающим событием, (обозначенным T)

$$T = \left\{ \begin{aligned} &\text{За рассматриваемый период времени } t \\ &\text{вагон сойдет с рельсов} \end{aligned} \right\}$$

- и, полагаясь на ответы экспертов на соответствующие вопросы, построить упомянутую модель [6].

На рис. 1 показана древовидная модель аварийности вагона (кружками обозначены неразлагаемые события, а квадратами – разлагаемые). Связи между событиями отображаются с помощью логических операторов: «И»

(обозначено \odot) и «ИЛИ» (обозначено \oplus).

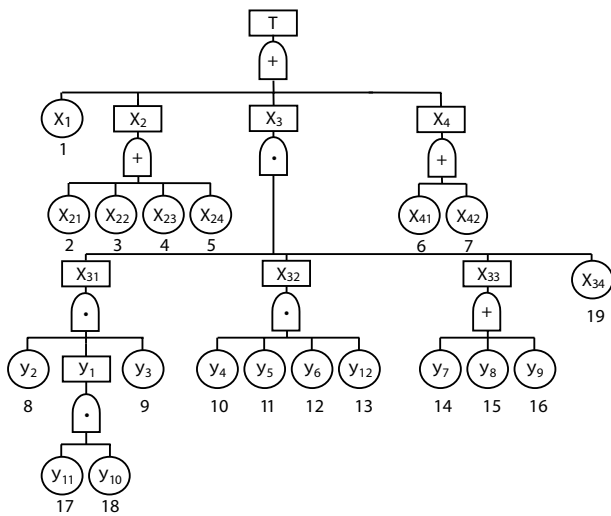


Рис.1. Древоидная модель аварийности вагона

На рисунке: x_1 – разрушение колеса; x_2 – обрыв и падение на путь деталей; x_3 – вкатывание гребня колеса на головку рельса; x_4 – разрушение шейки оси; x_{21} – боковина тележки; x_{22} – надрессорная балка; x_{23} – детали ударно-тягового механизма; x_{24} – детали автотормозного оборудования; x_{31} – угол набегания колеса на рельс превышает допуск; x_{32} – угол наклона образующей гребня колеса к горизонтали вне пределов допуска; x_{33} – горизонтальная составляющая нагрузки на колесо намного превышает вертикальную; x_{34} – неблагоприятное сочетание параметров пути и ходовых частей вагона; x_{41} – разрушение сепаратора подшипника буксы; x_{42} – разрушение кольца подшипника; y_1 – перекоз колесных пар в тележке; y_2 – неотрегулированность зазоров скользунах; y_3 – завышение фрикционных клиньев; y_4 – отклонение технических характеристик рессорного подвешивания от номинала превышает допуск; y_5 – разность диаметров колес в колесной паре превышает допуск; y_6 – «забегание» боковых рам тележки; y_7 – нарушение режима движения поезда в кривых малого радиуса; y_8 – поперечное смещение центра масс груза вне пределов допуска; y_9 – выжимание порожнего вагона; y_{10} – превышение нормы зазоров в продольных и поперечных направлениях между корпусом буксы и боковиной тележки; y_{11} – износ опорных поверхностей боковины тележки превышает допуск.

Так как древоидное представление модели аварийности вагона не приспособлено к количественному определению вероятности завершающего события (в данном случае события T), то от древоидного представления рассматриваемой модели перейдем к двухполюсному.

Для этого воспользуемся методом нахождения подмножеств минимальных сечений дерева событий (ДС)

[10]. При этом воспользуемся тем обстоятельством, что список основных событий (элементов ДС), принадлежащих к множеству минимальных сечений, имеет матричную структуру. Строится искомая матрица согласно следующему мнемоническому правилу:

- если промежуточным (или вершинным) событием управляет оператор «ИЛИ», то заменяем это событие на входные (в оператор) элементы отдельным столбцом;
- если же промежуточным (или вершинным) событием управляет оператор «И», то заменяем это промежуточное событие на входные (в этот оператор) элементы в виде отдельной строки.

Заметим, сечение есть характеристика системы, это та совокупность элементов, отказ которых гарантирует отказ системы [10, с. 183].

В результате получена матрица минимальных сечений ДС [6]:

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 8 & 17 & 18 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 & 19 \\ 8 & 17 & 18 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 15 & 19 \\ 8 & 17 & 18 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 16 & 19 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 7 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Каждая строка этой матрицы есть минимальное сечение. В итоге получаем последовательно-параллельную структуру системы (сход вагона с рельсов).

Воспользовавшись методом нахождения подмножеств минимальных сечений дерева событий (рис. 1), получим двухполюсную модель аварийности вагона [6] (рис.2).

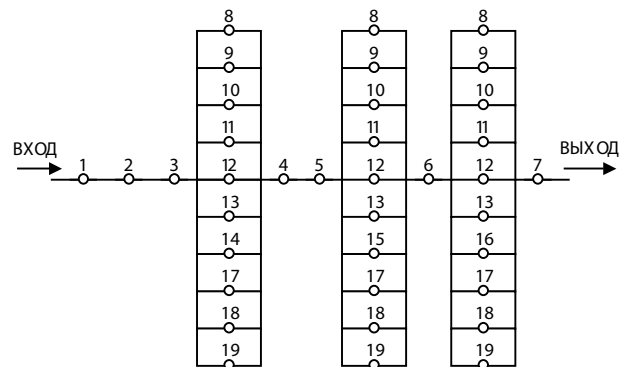


Рисунок 2. Двухполюсная модель аварийности вагона

Из данного рисунка видна огромная разница между двумя группами опасных повреждений вагона в смыс-

ле влияния на сход его с рельсов, что должно учитываться при проектировании вагона:

- а) группа опасных повреждений, появление каждого из которых чревато крушением поезда (их номера с 1 по 7);
- б) каждое опасное повреждение второй группы десятикратно зарезервировано относительно появления завершающего события T .

Наличие двухполюсного представления модели аварийности позволяет получить формулу риска крушения поезда, которому предшествует, как правило, сход вагона с рельсов.

$$G(t) = 1 - \prod_{i=1}^7 \bar{F}_i(t) \cdot \prod_{j=14}^{16} [1 - B \cdot F_j(t)], \quad (9)$$

где

$$B = \prod_{k=8}^{13} F_k(t) \cdot \prod_{j=17}^{19} F_j(t); \quad \bar{F}_i(t) = 1 - F_i(t); \quad \bar{F}_i(t) = 1 - F_i(t).$$

- 2. Благодаря древовидной модели аварийности (рис. 1) получаем список элементов конструкции вагона и типы их повреждений, которые могут привести к сходу вагона с рельсов.
- 3. С помощью специальных средств производится муляжирование упомянутых составных частей под их опасные повреждения (их номера с 1 по 7, см. рис. 1) определенной совокупности из номеров вагонов определенного типа и одного года изготовления, находящихся в ДР. Работа выполняется сотрудниками ревизорского аппарата дороги (или РКЦУ).
- 4. О номерах вагонов, оборудованных муляжированными элементами их конструкций, датах начала их нормального использования по назначению конфиденциально сообщается в ГВЦ ОАО «РЖД».
- 5. ГВЦ ОАО «РЖД» с помощью космической системы «ГЛОНАСС» отслеживает траекторию перемещения по сети железных дорог во времени каждого из номеров подконтрольных вагонов. При этом фиксируются ПТО станций, где не были замечены нанесенные признаки опасных повреждений вагонов.
- 6. Работники ПТО тех станций, где были замечены муляжи повреждений, мотивированы к подаче сведений в ГВЦ ОАО «РЖД» в установленной форме, так как, с одной стороны, перед началом функционирования системы мониторинга они под расписку были оповещены о начале работы указанной системы. С другой стороны, неподача сведений об обнаружении муляжей повреждений означает брак в работе конкретного осматривателя вагонов.

Таким образом, получаем выборку наработок в скрытом аварийном состоянии (САС) каждого элемента конструкции вагонов рассматриваемой совокупности (из N единиц) муляжированного под опасное повреждение (ОП).

Основные этапы получения функций $F(y)$ и $Q(y)$, входящих в формулу ЦФ (8)

1. С помощью системы ЦПУВ в соответствии со стандартным планом испытаний на надежность [NRT] накапливаются данные о наработках вагонов указанной совокупности до обнаружения опасных повреждений, типы которых выявлены в процессе построения древовидной модели аварийности вагона.

2. Формируются массивы указанных данных относительно каждого из девятнадцати типов опасных повреждений. Введём обозначение: y_{ij} – наработка j -го вагона до обнаружения в нем опасного повреждения i -го типа.

3. С помощью известных методов определяем функцию распределения $Q_i(y)$ случайной величины, (обозначенной η_i , где $i=1-19$), которая порождает выборку $y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{in}, \dots$ (1.1)

Заметим: под наблюдением ЦПУВ в данном случае находятся только муляжированные вагоны.

4. Используя АСК своевременного обнаружения опасных повреждений вагонов рассматриваемой совокупности в период их использования по назначению (за время T), формируется выборка наработок $z_{i1}, z_{i2}, z_{i3}, \dots$ (1.2)

где z_{ij} – наработка вагона j -го вагона в САС из-за наличия в нем опасного повреждения i -го типа.

5. Формируется массив данных $x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots$ (1.3)

где x_{ij} – наработка j -го вагона до появления в нем опасного повреждения i -го типа согласно выражению:

$$x_{ij} = y_{ij} - z_{ij}. \quad (1.4)$$

6. Имея выборку (1.3), находим функцию распределения $F_i(y)$ случайной величины ξ_i – наработка вагона до появления опасного повреждения i -го типа.

7. Располагая законами распределения наработки вагона до появления опасного повреждения i -го типа $F_i(y)$ и его обнаружения $Q_i(y)$ (где $i=1-19$), требуется найти выражение для $F(y)$ и $Q(y)$, входящих в целевую функцию (8). Для этого воспользуемся по сути дела структурной функцией рассматриваемой системы, т.е. формулой риска крушения поезда (9) [6]:

$$G(t) = 1 - \prod_{i=1}^7 \bar{G}_i(t) \cdot \prod_{k=14}^{16} [1 - B \cdot G_k(t)], \quad (10)$$

где $B = \prod_{i=8}^{13} G_i(t) \cdot \prod_{j=17}^{19} G_j(t);$

$G_n(t)$ – функция распределения интересующий нас случайной величины:

$$G_n(t) = \begin{cases} P\{\xi_n \leq t\}, & \text{если речь идет о наработке вагона до появления ОП;} \\ P\{\eta_n \leq t\}, & \text{если речь идет о наработке вагона до обнаружения ОП.} \end{cases}$$

Вспользуемся формулой (6) следующим образом. Сначала, подставляя в формулу (10) вместо $G_n(t)$ функцию $Q_i(t)$, получим формулу функции распределения $Q(y)$, то есть функции распределения наработки вагона до обнаружения одного из девятнадцати опасных повреждений.

Затем, подставляя в ту же формулу (6) вместо $G_n(t)$ функцию $F_n(t)$, получим формулу функции распределения наработки вагона до появления опасного повреждения, то есть $F(y)$.

8. Находим то значение $l_{БД}$, при котором целевая функция (8) принимает максимальное значение.

К сожалению, на этом не заканчиваются трудности, связанные с решением оптимизационной задачи (4)–(7). Как выше было отмечено, с целью устранения ограничения на использование метода динамического программирования при решении оптимизационной задачи (3) достаточно предварительно определить матрицу межремонтных пробегов $[l_{ij}]$ с помощью решения задачи (4)–(7). Для этого следует располагать значениями ряда параметров состояния ЖДТ, которые фигурируют в задаче (4)–(7). Однако эти параметры можно определить, только решив задачу (3).

Для разрешения данной коллизии в [4] приведена методика определения матрицы $[l_{ij}]$ с помощью метода итераций. Тем самым полностью снимается ограничение на решение задачи (3) с помощью метода динамического программирования с целью получения количественной оценки эталонного состояния отрасли (то есть определение оптимальных параметров состояния ЖДТ, представленных в таблице 1).

Остается только позаботиться о том, чтобы было обеспечено эффективное использование результатов решения задачи (3). Это может быть достигнуто на практике, если вагон на этапе его проектирования будет вписан в эксплуатационную среду, (как это принято говорить, например, при вписывании его в габарит). Таким образом, сам процесс проектирования вагона должен представлять собой процесс вписывания его в эксплуатационную среду вагона, имеющую следующие составляющие:

- процесс использования вагона по значению, интенсивность которого количественно определяется величиной его оборота ($\psi^{(12)}$) и среднесуточного пробега ($\psi^{(17)}$);
- динамическая, статическая, климатическая и иная нагруженность вагона, интенсивность которой определяется темпом накопления повреждений в материале его конструкции и которая реализуется в виде отказов вагона в случайные моменты времени;
- технический уровень предприятия линейного вагонного хозяйства, который количественно характеризуется мощностью ремонтного хозяйства ваго-

нов рассматриваемого типа ($\psi^{(9)}$), себестоимостью и качеством технического содержания вагонов ($\psi^{(13)}$, $\psi^{(10)}$), а также косвенно – параметрами $\psi^{(3)}$, $\psi^{(4)}$, $\psi^{(5)}$, $\psi^{(6)}$ и $\psi^{(7)}$ (см. табл. 1).

Парирование последствий существующей практики проектирования вагонов в дореформенный период в определенной мере осуществлялось вагонным хозяйством благодаря отработанной за многие годы системе управления техническим состоянием вагонов (УТСВ), в основе которой лежат пять связанных между собой функций:

- 1) своевременное обнаружение повреждений и отказов вагонов в процессе использования их по назначению;
- 2) техническое обслуживание и текущий ремонт вагонов в пути следования;
- 3) подготовка вагонов к погрузке;
- 4) техническая ревизия определенных агрегатов и ремонт вагонов крупного объема;
- 5) разработка технических требований и заказ новых вагонов, модернизация и исключение устаревших вагонов из эксплуатации.

Достигнутый в результате реализации этих функций некий баланс в соотношении «уровень безопасности движения (БД) – затраты на техническое содержание вагонов» оказался сегодня под угрозой в результате проводимой реформы. Так, вместо одного единственного субъекта в системе УТСВ (ВХ старого образца) появились три независимых и не конкурирующих между собой субъекта, имеющих несовпадающие интересы. Это: вагонное хозяйство нового образца, которое исполняет первые три из указанных функций системы УТСВ, три конкурирующих между собой вагоноремонтных компании (ВРК), исполняющие четвертую функцию, а также исполнитель пятой функции системы УТСВ – многочисленное, но не сплоченное организационно сообщество собственников вагонов. Причем упомянутый дефицит сплоченности негативно отражается на качестве научного сопровождения исполнения весьма ответственной и наукоемкой функции системы УТСВ применительно дважды, так сказать, бесхозному подвижному составу. Во-первых, грузовой вагон не приписан к конкретному ремонтному предприятию и к тому же используется по назначению по так называемой регулировке. Во-вторых, собственники вагонов исполняют и операторские функции, вследствие чего, в первую очередь, возникает вопрос о совместимости второй функции собственников вагонов со стратегией использования вагонов по так называемый регулировке, которая в купе с отсутствием приписки к конкретному ремонтному предприятию является следствием господствующего с 1869 года принципа бесперегрузочного передвижения

Краткий анализ основных функций системы УТЦВ

Функция	Проблема	Причины	Пути решения	Эталон, к которому следует стремиться
Своевременное обнаружение повреждений и отказов вагонов в пути их следования	Обусловлена противоречиями между требованиями ПТЭ и возможностями работников ПТО обеспечить 100-процентное безаварийное проследование вагонов по гарантийному участку ПТО	<ul style="list-style-type: none"> - Ограниченная или нулевая контролепригодность некоторых ответственных элементов конструкции вагона; - Осмотрщики вагонов не вооружены техническими средствами обнаружения повреждений; - Дефицит времени на осмотр вагона и тяжёлые условия работы осмотрщиков. 	<ul style="list-style-type: none"> - Разработка эффективных технологий контроля технического состояния поездов; - Повышение квалификации и технологической дисциплины осмотрщиков; - Внедрение стационарных и переносных технических средств обнаружения повреждений; - Повышение контролепригодности вагонных конструкций в эксплуатации. 	<p>Полная автоматизация рассматриваемой функции за счёт:</p> <ul style="list-style-type: none"> - использования встроенных в материал ответственных элементов конструкции вагонов датчиков, способных фиксировать их предельное состояние; - устройств автоматической передачи показаний датчиков в отраслевую компьютерную сеть.
Техническое обслуживание и текущий ремонт вагонов в пути следования	Для повышения крайне низкой производительности труда ремонтников ПТО (даже по меркам ДР) необходимо основные объёмы работ по ТР производить на пунктах отцепочного текущего ремонта. Однако это противоречит интересам работников других служб (движения и пути).	<p>Низкая производительность труда из-за:</p> <ul style="list-style-type: none"> - разбросанности рабочих позиций в пределах парков технической станции, что мешает обеспечить требуемый уровень механизации труда; - больших затрат времени и энергии на переходы от одного неисправного вагона к другому; - интервальности прибытия поездов, из-за чего 40% рабочего времени работники простаивают; - плохих и вредных условий труда. 	<ul style="list-style-type: none"> - Требуется разработать такие показатели работы движущих и путейцев, при которых они были бы заинтересованы в производительном и качественном ТР вагонов на ПТО; - Расширить список повреждений и отказов, по которым вагоны следует подавать в текущий отцепочный ремонт. 	<ul style="list-style-type: none"> - Вагоны даже с незначительными повреждениями отцепляются от состава и подаются в специализированные отопляемые помещения, которые оборудованы средствами диагностики, подъёмно-транспортным оборудованием и другими средствами механизации труда; - Агрегатный метод ремонта; - Технологии безразборной диагностики; - Доступ к отраслевой компьютерной базе данных о каждом вагоне.
Техническая ревизия соответствующих агрегатов вагонов, а также их ремонт крупного объема	Руководство вагонных депо в силу известных причин имеет возможность особо не опасаясь наказаний отбирать вагоны, в первую очередь, с наименьшими объёмами восстановительных работ.	<ul style="list-style-type: none"> - Различный уровень изношенности и повреждаемости вагонов даже одного года выпуска на момент постановки ДР; - Дефицит материалов и запасных частей; - Сумма компенсации за ДР, получаемая вагонным депо, является фиксированной и не зависит от действительных затрат предприятия. 	<ul style="list-style-type: none"> - Использовать и совершенствовать разработанную на базе ДИСПАРК технологию автоматизированной постановки вагонов по пробегу в ДР; - При этом следует помнить, что посредством этой технологии реализуется затратный механизм организации ДР; - Установить порядок контролепригодного протоколирования фактических затрат депо на ДР каждого вагона и передачу этих данных в отраслевую компьютерную сеть (согласно указанию МПС №А-308А от 07.04.2000 г.) 	<p>ДР по техническому состоянию вместо действующей стратегии ДР по наработке.</p> <p>Для чего:</p> <ul style="list-style-type: none"> - установить периодичности глубоких диагностик вагонов различного типа; - организовать на МПРВ отделения глубокой диагностики; - разработать и внедрить экспертный метод глубокой диагностики; - желательны перейти на новую технологию ТР.

грузовых вагонов по сети железных дорог России. Понятно, что этот принцип обусловлен известным всем географическим фактором (огромная территория страны), который вряд ли целесообразно нарушать (и не только в экономическом смысле).

Во избежание ситуации, описанной в известной басне Крылова «Лебедь, рак и щука», требуется разработка научно обоснованных рекомендаций и мероприятий, направленных на консолидацию интересов и действий указанных выше субъектов системы УТЦВ. В этой связи, во-первых, чтобы обеспечить исполнение упомянутого принципа бесперегрузочного передвижения грузовых вагонов на сети железных дорог

страны, целесообразно разработать вариант взаимоотношений между ОАО «РЖД» и собственником вагонов, согласно которому ОАО «РЖД» получает от собственника вагоны в аренду на определенный срок для их эксплуатации по технологии, оправдавшей себя в течение многих десятилетий. При этом под термином «эксплуатация изделия» понимается процесс его существования, при котором оно используется по назначению, технически обслуживается и ремонтируется. Во-вторых, характер и степень взаимодействия субъектов системы УТЦВ должны быть адекватны тем связям, которые существуют между параметрами системы ТОР вагонов. В-третьих, указанные мероприятия должны

быть, в основном, нацелены на эффективную реализацию рекомендаций, полученных в результате анализа основных функций системы УТЦВ, представленной в виде таблицы 2 [4].

В результате этого анализа относительно каждой из трех наиболее важных функций системы УТЦВ сформулирована проблема, причина ее появления, возможные пути решения проблемы и эталонная технология исполнения функции, к которой следует стремиться.

Однако указанные в данной таблице пути решения проблемы исполнения функций системы УТЦВ и продвижение к эталонным технологиям их исполнения должны быть согласованы таким образом, чтобы ВЛХ и ЖДТ в целом функционировали в оптимальном относительно заранее выбранного критерия режиме.

Для практической реализации этой рекомендации целесообразно на этапе проектирования вагона использовать в оптимизационной задаче (4)–(7) новый для транспортной науки объект исследования: система «вагон – эксплуатационная среда». Именно этой оптимизационной задаче отведена роль инструмента для разработки мероприятий, направленных на консолидацию интересов упомянутых выше трех субъектов системы УТЦВ.

В связи с этим, на этапе проектирования вагонов рекомендуется как минимум предусмотреть:

- а) на основе тщательного анализа конструкции вагона-аналога как объекта контроля технического состояния (ТС), технического обслуживания (ТО) и текущего ремонта (ТР) согласно алгоритму, представленному на рис. 3, разработать конкретные конструкторские рекомендации в части повышения уровня ремонтпригодности проектируемого вагона [3, с. 222-224];
- б) на аргументы целевой функции (1) или, что то же самое, на объект оптимизации следует наложить следующие ограничения (или требования).
 1. Объект оптимизации должен исполнять роль связующего звена между объектами различной природы - конструкцией вагона и его эксплуатационной средой, описание которой приведено выше.
 2. Должен быть удобным для наложения на него следующих ограничений:
 - 2.1. обеспечивающих безопасность движения;
 - 2.2. позволяющего учитывать существующие мощности ремонтной базы вагонов рассматриваемого типа;
 - 2.3. обеспечивающего требуемый уровень качества ДР.
 3. Позволяющие учитывать следующие обстоятельства:

3.1. По мере старения вагона возникает необходимость в более частой его постановке в глубокую диагностику. Чтобы учесть это обстоятельство, будем полагать, что по мере старения вагона должна увеличиваться структура каждого последующего его ремонтного цикла.

3.2. Максимальное количество капитальных ремонтов за срок службы вагона не должно противоречить здравому смыслу экспертов, о чем следует помнить при формировании исходных данных в виде множества матриц типа (11), которое является областью определения целевой функции (1).

Указанным требованиям удовлетворяет матрица межремонтных пробегов вагонов трапецидальной конфигурации:

$$[l_{ij}] = \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & \dots & l_{1m_1} & & & \\ l_{21} & l_{22} & \dots & l_{2m_2} & \dots & l_{11} & \\ \vdots & & & & & & \\ l_{n1} & l_{n2} & \dots & l_{nm_1} & \dots & l_{nm_2} & \dots & l_{nm_n} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

где l_{ij} – j -й межремонтный пробег вагона в пределах i -го ремонтного цикла.

Свойства матрицы (8):

1. Число строк на единицу больше числа капитальных ремонтов за нормативный срок службы (НСС) вагона;
2. Количество элементов в i -й строке матрицы на единицу больше числа деповских ремонтов в пределах i -го ремонтного цикла.
3. Сумма элементов матрицы (11) есть нормативный срок службы вагона.

Итак, если из заданного множества матриц типа (11) выделена та, которая удовлетворяет задаче (4)–(7), то получаем оптимальные значения:

- НСС вагона;
- количества КР вагона за НСС вагона;
- числа ДР вагона в пределах каждого ремонтного цикла;
- межремонтных пробегов вагона.

В заключение отметим, что благодаря предлагаемой методике представляется возможным практически освоить решение указанной выше важной задачи транспортной науки, а именно: количественная идентификация эталонного состояния отрасли. Это позволит разрабатывать научно обоснованные рекомендации в части реформирования рассматриваемой отрасли не только в настоящее время, но, что особенно важно, и в будущем.

Используемая в рамках рассматриваемой методики многоуровневая модель управления отраслью позволяет анализировать ту или иную проблему на различных уровнях управления транспортом от линейного до государственного и даже мирового.

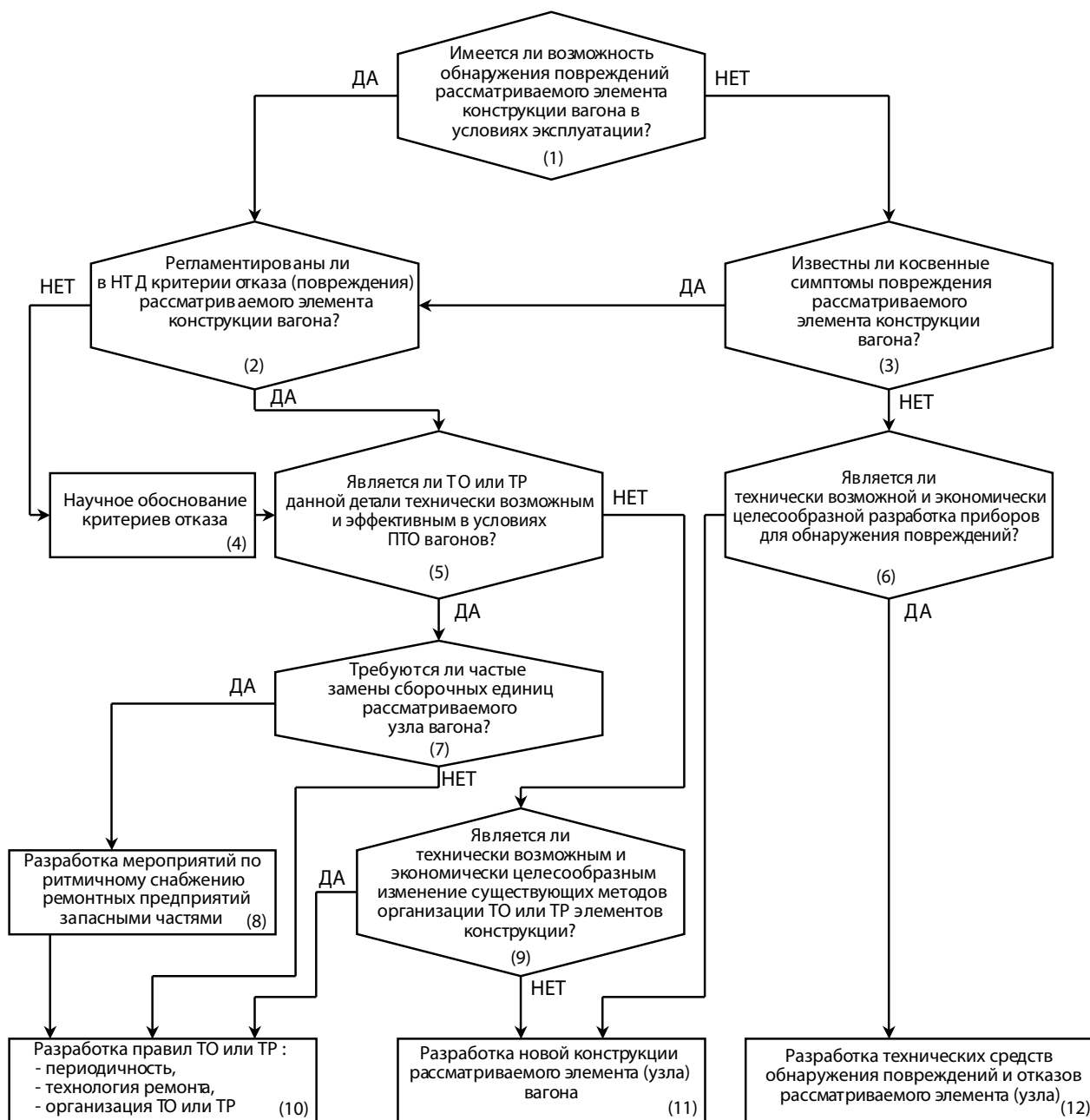


Рис.3. Блок схема алгоритма анализа конструкции вагона-аналога как объекта контроля ТС, ТО и ТР

В связи с последним замечанием отметим следующее. Разработка данной модели и решение на ее основе указанной выше главной проблемы транспортной науки - особенно актуальная задача в части реализации возможностей, вытекающих из т.н. географического фактора в России - ее транзитных ресурсов. Это позволяет приступить к созданию сети железных дорог планетарного (мирового) уровня, обеспечивающей высокоскоростное, бесперегрузочное и всепогодное сухопутное перемещение пассажиров и грузов между пунктами, находящимися на различных континентах. Для этого достаточно построения на территории РФ так называемой полярной магистрали, (строительство которой было за-

брошено в начале 50-х годов прошлого века) и тоннеля под Беринговым проливом. Тем самым будет дан достойный ответ современной цивилизацией той, при которой был освоен так называемый Великий шелковый путь.

В результате реализации этого проекта выявятся особенно рельефно конкурентные преимущества ЖДТ над другими видами транспорта. В самом деле, в перспективе при разработке и реализации крупных проектов, в том числе транспортных, в качестве основного критерия все чаще будет использоваться минимум вредного влияния на среду обитания человека, нанесение экологического ущерба, который однажды станет непоправимым.

Так, по данным зарубежных специалистов, вредных выбросов в расчете на один пассажиро-километр у электрических поездов меньше в 300-400 раз по сравнению с авиационным и в 8-12 раз – по сравнению с автомобильным транспортом. Примерно такая же картина и относительно грузовых перевозок, и, в том числе, морским транспортом.

Именно поэтому наблюдается тренд в части внедрения так называемых зеленых логистик. Так на территории Европы, согласно Белой книге, принятой Еврокомиссией в 2011 г. все пассажирские и грузовые перевозки дальностью более 300 км должны осуществляться по железной дороге [8].

Реализация этого проекта позволит потеснить на рынке перевозок не только автомобильный, но также и авиационный и морской транспорт. Налицо ведущая роль России в деле сохранения экологического баланса на нашей планете. Причем в этом случае улучшение экологической ситуации на планете, скорее всего, будет сопровождаться и понижением себестоимости перевозок на ней.

Реализации рассматриваемого проекта также положительно скажется на социально-экономическом положении нашей страны, о чем подробно говорится в [9].

В немалой степени решение указанной выше проблемы транспортной науки будет способствовать дальнейшему совершенствованию информационной базы отрасли. Так, требуется освоение методики производства данных для грамотного обоснования ограничений на параметры состояния ЖДТ (см. табл. 1) при решении оптимизационной задачи (3).

Важно также освоение технологии производства эксплуатационных данных с тем, чтобы:

- а) в качестве целевой функции (1) использовать себестоимость единицы т-км работы транспорта;
- б) по данным системы ЦПУВ о наработках вагона до обнаружения опасных повреждений получать данные о наработках вагонов до их появления.

Ранее были предложены и другие направления совершенствования информационной базы ЖДТ [2].

Литература

1. Устич П.А., Иванов А.А., Мышков В.Г. Дедуктивно-аксиоматический подход к созданию системы интеллектуального управления ЖДТ // Мир транспорта. - 2010, №1.
2. Устич П.А., Иванов А.А., Митюхин В.Б. Концепция интеллектуального управления // Мир транспорта. - 2008, №3.
3. Вагонное хозяйство: учебник для вузов ЖДТ / Под ред. Устича П.А. - М.: Маршрут, 2003. - 523 с.
4. Устич П.А., Иванов А.А., Чернышова Л.М. Модель решения оптимизационных задач // Мир транспорта. - 2014, №1.
5. Устич П.А., Иванов А.А., Садчиков П.И., Устич Д.П., Шикина Д.И. Методология гармонизации основных положений императива рынка транспортных услуг // Железнодорожный транспорт. - 2010, №8.
6. Устич П.А., Иванов А.А., Садчиков П.И. Формула риска и показатель безопасности // Мир транспорта. - 2006, №2.
7. Устич П.А., Иванов А.А., Аверин Г.В., Кузнецов М.А., Петров С.В. Некоторые аспекты проблемы нормирования уровня безопасности движения на примере железнодорожного транспорта // Надежность. - 2011, №1.
8. Александрова К. Зеленые технологии в логистике: экологичность против рентабельности // РЖД. Партнер. - 2013, №5.
9. Пашкова Т.Л. Полярная магистраль. - М.: Вече, 2007. - 448 с.
10. Устич П.А., Карпычев В.А., Овечников М.Н.: Надежность рельсового нетягового подвижного состава. - М.: Маршрут, 2004. - 411 с.

Сотников Е.А., ОАО «ВНИИЖТ», г. Москва

Интеллектуализация оперативного управления перевозочным процессом на уровне региональной дирекции управления движением

В региональной дирекции управления движением (Д) имеется множество автоматизированных рабочих мест (АРМ), на каждом из которых диспетчерский аппарат в течение дежурной смены принимает по своему кругу ведения множество оперативных управляющих решений (ОУР) с целью обеспечения устойчивой эксплуатационной работы.

За короткое время, которое реально имеется для принятия ОУР, человеку-диспетчеру невозможно просчитать эффективность различных решений, учесть большое число влияющих на перевозочный процесс параметров. Поэтому опыт и интуиция диспетчеров сегодня играют решающую роль в принятии ОУР.

Переход к интеллектуальным АРМ состоит в том, что выработка ОУР осуществляется по специальным алгоритмам интеллектуализированным АРМом (назовем его АРМИ) на основе разработанной имитационной модели работы управляемого полигона с использованием необходимого для работы модели комплекса данных информационно-управляющих систем. При этом должно учитываться максимальное число влияющих параметров и опыт лучших оперативных работников. В АРМИ также должна обязательно реализовываться функция самообучения системы.

Попытка построить единую для полигона Д имитационную модель, с использованием которой решаются все оперативные задачи на всех звеньях управления, неизбежно наткнется на трудности, связанные с выявлением многочисленных параметров, их увязкой, программированием. Оперативное слежение за такой имитационной моделью также потребует значительных усилий.

В сложных системах используют их декомпозицию с выделением отдельных подсистем. При этом в каждой подсистеме используют свой набор параметров. Этот принцип целесообразно применить и при разработке АРМИ для диспетчеров различных звеньев оперативного управления на региональном уровне. Для каждого звена учитываются объемы и параметры, существенно влияющие на поведение подсистемы. Выбор таких параметров осуществляется совместно с практическими работниками.

Ниже рассмотрены принципы построения интеллектуальной подсистемы для верхнего звена – ДГПС (ДГПплан), реализуемой в АРМИ ДГПС.

Прежде всего необходимо сформировать пространственно-технологическую модель полигона Д, для чего

весь полигон делится на технические объекты (ТО) полигона, количество которых для упрощения модели следует минимизировать. Так, для звена ДГПС, как правило, нет необходимости учитывать время хода поездов по перегонам между промежуточными станциями. В различных расчетах может использоваться такой параметр, как время хода поезда по участку или группе участков. Поэтому в качестве ТО может использоваться не перегон, а участок. В качестве ТО также выступают сортировочные и участковые станции, крупные грузовые станции и крупные подъездные пути. В модели должны присутствовать стыковые станции полигона и смежные полигоны других дирекций управления движением, с которых поступают поезда.

Для каждого ТО полигона Д формируется его техническая характеристика в виде показателей, определяющих качество работы ТО в зависимости от объема выполняемых перевозок (работы).

Для определения объемов работы ТО в плановый период необходимо структурировать поезда- и вагонопотоки по условиям возможности составления указанных прогнозов:

1. Внешний подход поезда- и вагонопотока
 - 1.1 организованные поезда в адрес Д на других полигонах;
 - 1.2 вагоны, находящиеся вне организованных поездов на путях станций других полигонов на момент;
 - 1.3 вагоны, находящиеся на путях грузовых фронтов станций других полигонов под погрузкой или выгрузкой, которые в дальнейшем будут следовать в качестве транзитных или местных вагонов в адрес Д (потенциал транзитных и местных вагонов).
2. Внутренний поезда- и вагонопоток
 - 2.1 организованные поезда на полигоне Д на момент;
 - 2.2 вагоны, находящиеся вне организованных поездов на путях станций полигона Д;
 - 2.3 вагоны, находящиеся на путях грузовых фронтов станций полигона Д (потенциал транзитных и местных вагонов).

Для каждой группы поездов и вагонов данной Структуры должна учитываться своя специфика прогнозирования их подхода.

Если оперативные процессы проходят в рамках существующей технологии, то диспетчерский персонал

выполняет лишь функцию контроля хода перевозочного процесса. Например, если все поезда следуют строго по графику, то каких-либо оперативных управляющих решений принимать не требуется. Если же ход перевозочного процесса начинает не совпадать с действующей технологией, то необходимо принятие ОУР. Для интеллектуализации выработки ОУР на уровне ДГПС необходимо определить их перечень, условия принятия таких решений и разработать алгоритмы принятия ОУР для их реализации в программном обеспечении АРМ ИДГПС. Перечень ОУР включает в себя:

- а) изменение направления следования поездопотока (вагонопотока) в пределах Д;
- б) изменение направления следования поездопотока (вагонопотока) со сменой стыка передачи поездов на смежные Д₁ или со сменой пограничного перехода;
- в) корректировка плана формирования поездов в пределах Д (дорожный план формирования);
- г) корректировка плана формирования поездов на полигонах других дирекций управления движением в адрес полигона Д;

- д) вождение соединенных поездов;
- е) вождение поездов повышенной массы и длины (по сравнению с установленной в графике движения);
- ж) изменение очередности следования поездов различных назначений плана формирования;
- з) временная отстановка составов (без локомотивов) на станционных путях и другие оперативные управляющие решения.

Основными ОУР по местной работе являются следующие:

- введение дополнительных маневровых и вывозных диспетчерских локомотивов при увеличении объема местной работы в целях обеспечения своевременного развоза местного груза;
- формирование заданий по подводу груженых и порожних вагонов к грузовым фронтам с целью обеспечения их ритмичной загрузки;
- углубленное взаимодействие с работниками подъездных путей с целью повышения эффективности работы грузовых фронтов.

Разработка АРМ ИДГПС должна выполняться при тесном взаимодействии научных и практических работников.

Ивутин А.Н., Ларкин Е.В., ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет», г. Тула
 Усов С.В., ООО «ТСЗП», г. Москва

Моделирование систем с активным резервированием при нестационарных потоках отказов

Одним из способов обеспечения отказоустойчивости сложных кибернетических систем является резервирование узлов и блоков [1, 2, 3, 4, 5]. Активное резервирование предполагает, что за состоянием резервируемого элемента ведется постоянное наблюдение некоторым внешним, по отношению к элементу устройством [6]. Параметры резервируемого элемента сравниваются с эталонными значениями, а при отклонении их от заданного уровня происходит переключение на резервный элемент.

Схема с переключениями приведена на рис. 1.

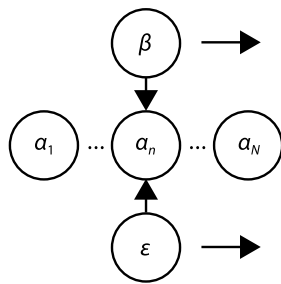


Рис. 1. Схема активного резервирования

Структура системы с активным резервированием элемента может быть представлена в виде многосвязного графа [6]. В текущий момент времени в вершину α_n направлены дуги, ведущие из вершин β и ϵ , что моделирует связи активного элемента. Вершины с α_1 по α_{n-1} , моделирующие неработоспособные элементы, заштрихованы. Вершины с α_{n+1} по α_N моделируют элементы, которые ждут своей очереди на подключение. Стрелками на рисунке показана последовательность подключения резервных элементов. При активном резервировании с переключением к источнику входного сигнала β и нагрузке ϵ подключается только один резервируемый элемент α_n , который на текущий момент времени является работоспособным и после подключения становится активным. При отказе подключенного элемента он отключается как от нагрузки, так и от источника входного сигнала (становится пассивным), и в схему включается (становится активным) следующий элемент. Без нарушения общности можно считать, что при подобной схеме резервирования последовательно подключаются элементы с первого по N -й. При этом, если в процессе эксплуатации включенным в структуру оказывается n -й элемент, то элементы с первого по $(n-1)$ -й считаются неработоспособными.

Реализация логики работы системы с активным резервированием требует существования дополнительных аппаратных средств, которые осуществляют текущий контроль за состоянием включенного элемента, а также подключают к системе резервные элементы и отключают от нее отказавшие элементы. Указанное устройство само может являться источником отказа, как при выполнении функции контроля состояния резервируемого элемента, так и при выполнении функций подключения/отключения.

В простейшем случае резервирования переключением при отказах контролирующего блока система становится полностью неработоспособной. Для моделирования подобных ситуаций по методике, приведенной в [5], может быть построена сеть Петри-Маркова (СПМ), приведенная на рис. 2.

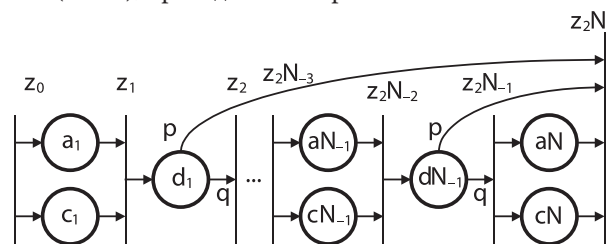


Рис. 2. СПМ, моделирующая переключения при активном резервировании

В СПМ позиции $\{a_1, \dots, a_n, \dots, a_N\}$ моделируют отказы элементов, позиции $\{c_1, \dots, c_n, \dots, c_N\}$ моделируют отказ контролирующего устройства; позиции $\{d_1, \dots, d_n, \dots, d_{N-1}\}$ являются позициями с плотностью распределения времени выполнения, описываемой δ -функцией Дирака. Переход z_0 является стартовым и моделирует начало эксплуатации системы. Переход z_{2N} является поглощающим и моделирует переход системы в неработоспособное состояние.

Логические условия выполнения полушагов из переходов z_{2n-1} , $n = 1, 2, \dots, N-1$ имеют следующий вид:

$$\Lambda(z_{2n-1}, d_n) = [(a_n, z_{2n-1}) \wedge (c_n, z_{2n-1})] \vee [(a_n, z_{2n-1}) \wedge (c_n, z_{2n-1})], \quad n = 1, 2, \dots, N-1, \quad (1)$$

где $\Lambda(z_{2n-1}, d_n)$ – логическое условие выполнения полушага из перехода z_{2n-1} в позицию d_n ; (a_n, z_{2n-1}) – событие выполнения полушага из позиции a_n в переход z_{2n-1} ; (c_n, z_{2n-1}) – событие невыполнения полушага из позиции c_n в переход z_{2n-1} .

Математическим подобием перехода системы в неработоспособное состояние является переключение

сети в состояние z_{2N} , которое происходит, если выполнены следующие логические условия:

$$\Lambda_{i\bar{i}} = (d_1, z_{2N}) \vee \dots \vee (d_n, z_{2N}) \vee \dots \vee (d_{N-1}, z_{2N}) \vee (a_N, z_{2N}) \vee (c_N, z_{2N}), \quad (2)$$

где полушаги $(d_1, z_{2N}), \dots, (d_n, z_{2N}), \dots, (d_{N-1}, z_{2N})$ моделируют отказ контролирующего устройства.

Вероятности выполнения полушагов $(d_1, z_{2N}), \dots, (d_n, z_{2N}), \dots, (d_{N-1}, z_{2N})$ определяются путем анализа «совреования» отказами элементов $\alpha_1, \dots, \alpha_n$ и отказом контролирующего устройства.

Указанные вероятности определяются по следующей зависимости:

$$p(t) = \frac{\lambda_c(t)}{\lambda_c(t) + \lambda_a(t)}, \quad (3)$$

где $\lambda_a(t)$ – интенсивность отказов контролируемого элемента; $\lambda_c(t)$ – интенсивность отказов контролирующего устройства.

Вследствие того, что отказы контролирующего устройства и очередного элемента составляют полную группу несовместных событий, вероятности выполнения полушагов $(d_1, z_2), \dots, (d_n, z_{2n}), \dots, (d_{N-1}, z_{2N-2})$ определяются по зависимости

$$q(t) = 1 - p(t) = \frac{\lambda_a(t)}{\lambda_a(t) + \lambda_c(t)}. \quad (4)$$

Плотности распределения времени выполнения хотя бы одного полушага в переходы $z_1, \dots, z_{2n-1}, \dots, z_{2N-1}$ определяются по зависимости (3.23), которая в данном случае принимает вид:

$$f(t) = [\lambda_c(t) + \lambda_a(t)] \exp \left\{ - \int_0^t [\lambda_c(\tau) + \lambda_a(\tau)] d\tau \right\}. \quad (5)$$

Плотность распределения суммарного времени достижения поглощающего перехода из стартового определяется по зависимости:

$$\phi(t) = \sum_{k=1}^N q(t)^{k-1} p(t) [f(t)]^{*k} + q(t)^N [f(t)]^{*N}, \quad (6)$$

где $[f(t)]^{*k}$ – k -кратная свертка плотности распределения $f(t)$.

Для случая стационарных параметров потока отказов элементов зависимости (3), (4) принимают вид:

$$p = \frac{\lambda_c}{\lambda_c + \lambda_a}, \quad (7)$$

$$q = 1 - p = \frac{\lambda_a}{\lambda_a + \lambda_c}. \quad (8)$$

Плотности распределения времени выполнения хотя бы одного полушага в переходы $z_1, \dots, z_{2n-1}, \dots, z_{2N-1}$ принимают вид:

$$f(t) = (\lambda_c + \lambda_a) \exp[-(\lambda_c + \lambda_a)t]. \quad (9)$$

Выражение для k -кратной свертки плотностей, входящих в (6), принимает вид закона Эрланга $(k-1)$ го порядка:

$$[f(t)]^{*k} = \frac{(\lambda_c + \lambda_a) [(\lambda_c + \lambda_a)t]^{k-1}}{(k-1)!} \exp[-(\lambda_c + \lambda_a)t]. \quad (10)$$

Математическое ожидание закона (10) определяется выражением:

$$T = \frac{k}{\lambda_c + \lambda_a}. \quad (11)$$

Плотность распределения суммарного времени достижения поглощающего перехода из стартового перехода определяется по зависимости:

$$\phi(t) = (\lambda_c + \lambda_a) \sum_{k=1}^N q^{k-1} p \frac{[(\lambda_c + \lambda_a)t]^{k-1} \exp[-(\lambda_c + \lambda_a)t]}{(k-1)!} + (\lambda_c + \lambda_a) q^N \frac{[(\lambda_c + \lambda_a)t]^{N-1} \exp[-(\lambda_c + \lambda_a)t]}{(N-1)!}. \quad (12)$$

Подставляя в (12) значения вероятностей, получим:

$$\phi(t) = \exp[-(\lambda_c + \lambda_a)t] \left[\sum_{k=1}^{N-1} \frac{\lambda_a^{k-1} \lambda_c t^{k-1}}{(k-1)!} + \frac{\lambda_a^{N-1} (\lambda_c + \lambda_a) t^{N-1}}{(N-1)!} \right]. \quad (13)$$

Математическое ожидание T_p времени достижения поглощающего перехода из стартового, равное математическому ожиданию времени нахождения системы в работоспособном состоянии при активном резервировании, определяется по зависимости:

$$T_p = \frac{1}{\lambda_c + \lambda_a} \left[\sum_{k=1}^{N-1} k q^{k-1} p + N q^{N-1} \right]. \quad (14)$$

Оценка эффективности пассивного резервирования может быть произведена по математическому ожиданию времени наработки до отказа предпоследнего из резервированных элементов системы [4].

Литература

1. Ларкин Е.В., Сабю Ю.И. Применение сетей Петри-Маркова при моделировании структурных отказов в системе // Известия ТулГУ. Сер. Вычислительная техника. Информационные технологии. Системы управления. Вып.4. Т.3: Системы управления. – Тула: ТулГУ, 2003. –С. 95–103.
2. Ларкин Е.В., Сабю Ю.И. Структурный анализ систем при построении отказоустойчивой авионики // Авиакосмическое приборостроение. – 2004. № 5. –С. 23–26.
3. Ларкин Е.В. Структурный анализ отказоустойчивости измерительно-информационных комплексов // Известия ТулГУ. Сер. Вычислительная техника. Информационные технологии. Системы управления. Т.1. Вып. 3. Вычислительная техника. – Тула: ТулГУ, 2004. –С. 14–20.
4. Ларкин Е.В. Имитационное моделирование отказов-восстановлений с применением сетей Петри-Маркова // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2005. № 12. – С. 35–38.
5. Ларкин Е.В. Формирование сетей Петри-Маркова для моделирования параллельных систем / Математическое и программное обеспечение вычислительных систем. – М. Горячая линия-Телеком, 2006. – С. 4–8.
6. Ларкин Е.В., Сабю Ю.И. Отказоустойчивость измерительно-информационных систем с активным резервированием // Известия ТулГУ. Сер. Вычислительная техника. Информационные технологии. Системы управления. Т.1. Вып. 2. Информационные технологии. Тула: ТулГУ, 2004. –С. 159–164.

Григорьянц А.Г., Ставертий А.Я., МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва
Третьяков Р.С., «Московский центр лазерных технологий», г. Москва
Усов С.В., МГТУ МАМИ, г. Москва

Компьютерное моделирование формы насадок для коаксиальной подачи материалов с целью управления ресурсом деталей железнодорожной техники

В современном железнодорожном транспорте являются востребованными технологии, предназначенные для повышения ресурса деталей машин и снижения вероятности их поломки. Ресурс в процессе эксплуатации механизмов наибольшим образом зависит от степени износа локальных участков рабочих поверхностей деталей. В связи с этим, важной является проблема восстановления изношенных поверхностей при сохранении всех остальных параметров и характеристик детали. Поэтому поиск и разработку высокопроизводительных методов и технологических процессов упрочнения новых и восстановления изношенных деталей, а также исследования их ресурса необходимо проводить для каждого конкретного случая применений. Одним из технологических методов, применимых для восстановления деталей машин, является лазерная наплавка с соосной подачей присадочного металлического порошка в зону обработки [1].

В данной технологии, как правило, порошок подается через полость между двумя или тремя коническими насадками оснастки. Такая конструкция имеет стабильные характеристики газопорошкового потока и позволяет с высоким коэффициентом использования порошкового материала наносить покрытия высокой плотности и стабильности на поверхности деталей машиностроения как плоской, так и сложной формы. Такие покрытия позволяют существенно повысить ресурс детали.

Одним из главных факторов, определяющих эффективность применения технологии лазерной наплавки, является правильный выбор и проектирование оснастки, в частности, сопловых насадок для подачи порошка, которые должны давать возможность наплавлять валики в широком диапазоне размеров, а также наносить различные материалы с получением оптимальных свойств металла покрытия, обеспечивающих определенный ресурс работы деталей.

Сопловые насадки для коаксиальной подачи материалов – это технологические приспособления, которые позволяют формировать стабильную газопорошковую струю с необходимыми параметрами. При различных требованиях к технологии используются сопла различной формы: с острым углом при вершине, с тупым углом при вершине, с малым и с большим диаметрами луча в плоскости обработки [2, 3, 4, 5, 6, 7].

В связи с этим, для определения оптимальной формы настраиваемого сопла для коаксиальной подачи порошкового материала было спроектировано для моделирования два варианта сопловых насадок в виде пар (внешняя/внутренняя) с целью поиска оптимального их сочетания (рис.1). Первый вариант с углом конуса при вершине 50 градусов, а второй – с углом 65 градусов. Такие размеры позволяют перенести плоскость наплавки от линзы как минимум на 10 мм и увеличить диаметр пятна в этой зоне.

Для выбора оптимальных размеров конуса сопла было проведено математическое моделирование движения частиц присадочного порошка в каналах оснастки до поверхности наплавки. Основной целью математического моделирования является проверка работоспособности различных конструкций сопла в процессе наплавки в условиях реально действующих факторов процесса и исследование влияния размеров сопла на параметры газопорошкового потока: расстояние от среза сопла до минимального диаметра потока, степень разброса частиц порошка.

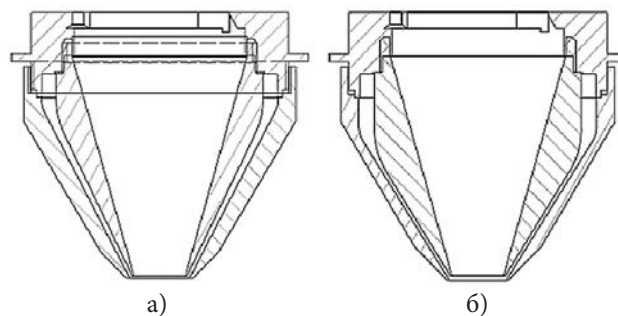


Рис.1. Формы сопел для исследования:
а) длинное сопло; б) короткое сопло.

Технологический процесс модифицирования лазерным излучением – сложный комплексный процесс, включающий совместное перемещение частиц в среде газа и металлической подложки по требуемой траектории при воздействии на них лазерного луча. Наиболее важным и сложным для описания в данном процессе является именно перемещение частиц в среде газа. Скорость частиц, траектория их движения, стабильность подачи, влияют на устойчивость процесса и качество наплавленного слоя наравне с параметрами лазерного излучения [8].

Для решения поставленной задачи проводилось моделирование процесса прохождения потока газа через сопло. Поскольку процессы подачи порошка и подачи газа являются установившимися, в расчете принимали, что поток является ламинарным, сжимаемым, однородным по составу и распространяется внутри сопла.

Для решения уравнений газовой фазы была использована кинетическая модель движения газа, а для расчета движения частиц – модель на основе потока газопорошковой взвеси [9]. Для осесимметричного, устойчивого, ламинарного, неразрывного потока газопорошковой струи с однородным химическим составом и при отсутствии внешних сил, было получено следующее выражение:

$$\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r}(r \rho u_r) = 0 \quad (1)$$

где x и r – соответственно осевые и радиальные координаты;

u_x – осевая скорость;

u_r – радиальная скорость;

ρ – плотность сплошного газа.

Расчет сопла проводился численным методом с использованием вычислительной машины, оптимизированной для расчета массива ячеек. Программа разбивает расчетный объем на параллельно рассчитываемые участки для нескольких процессоров. Транспортирующим газом является аргон, подаваемое количество которого регулируется массовым расходом. В связи с этим использовались следующие граничные условия для сжимаемого потока: входной расход газа, выходное давление в дальней зоне. Значение входного расхода являлось варьируемым параметром, выходное давление является следствием неразрывности потока газа.

Модель основана на механизмах, которые влияют на турбулентную составляющую кинетической энергии на единицу массы k [10].

$$K = \frac{1}{2(U^2 + V^2 + W^2)} \quad (2)$$

$$K = \frac{1}{2(u^2 + v^2 + w^2)} \quad (3)$$

$$k(t) = K + k \quad (4)$$

где K – основная кинетическая энергия;

k – турбулентная кинетическая энергия;

u, v, w – скорости по осям x, y, z соответственно.

Моделирование многофазных потоков производилось в несколько этапов. На первом этапе рассчитывали движения газовой среды. В результате расчета получили установившееся распределение газового потока в оснастке и на выходе из нее. На втором этапе производился расчет движения частиц в газовой среде. Третий этап является проверочным для выполнения законов сохранения и неразрывности среды.

Траектории частиц рассчитывались с использованием функции Лагранжа. Обмен теплотой, массой и моментом в рамках уравнений Эйлера для газовой среды. Доля дискретной фазы должна составлять не более 10% по объему. Массовая доля может быть значительно больше (до 100%). В расчете считается, что нет взаимодействия между частицами и не происходит их разрушения.

Траектория рассчитывается интегрированием баланса сил, действующих на частицу. Скорость частицы могут изменить различные силы: сила тяжести, сила сопротивления, как функция изменения относительной скорости, сторонние силы (трения, соударения), силы вращения, Броуновского движения, силы Саффмана и др.

Наиболее удобно для конструкторских расчетов газопорошкового потока и оснастки использовать пакет программ FLUENT. Данный комплекс позволяет получить не только качественную, но и количественную картину распределения порошковых частиц в полете.

Путем численного расчета и математического моделирования процесса истечения газопорошкового потока из сопел с разными углами конуса при вершине были получены конечные геометрические размеры конструкций, которые обеспечивают диаметр перетяжки потока от 1 до 5 мм на расстоянии от среза не менее 10 мм. Такие параметры позволяют, изменяя диаметр пятна, формировать качественные валики различной ширины при наплавке.

Установлено, что при угле конуса насадки при вершине в 52 градуса достигается минимальный диаметр сфокусированного газопорошкового потока, обеспечивающий минимальную ширину единичного валика (около 1 мм), а при угле схождения в 64 градуса получен валик максимальной ширины, при наплавке такой оснасткой достигается максимальная производительность процесса лазерной модификации поверхностей, при этом ширина валика больше диаметра расплавленной лазерным лучом ванны металла.

В результате расчета получен типичный газопорошковый поток, в котором частицы, вылетая из сопла, сходятся по инерции в общую точку с минимальным диаметром потока, а затем расходятся конусом (рис.2).

Характер истечения показывает, что все частицы порошка вылетают по подобным дугообразным траекториям в ламинарном потоке. Таким образом, газопорошковый поток остается ламинарным даже в более широких интервалах скоростей и расходов газа, чем однофазный газовый, поскольку массивные инертные частицы стабилизируют его и значительно снижают вероятность образования завихрений. Аналогичные результаты были получены в работах [12], что подтверждает результаты проведенного в данной работе моделирования.

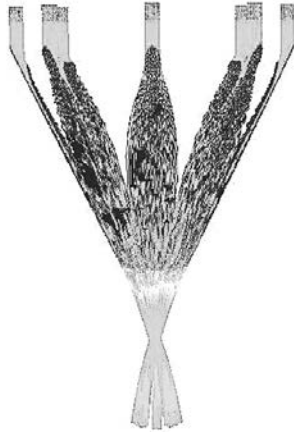


Рис. 2. Модель газопорошкового потока в двумерном сопле.

При той же скорости частиц, но меньшем размере по гранулометрическому составу, более мелкие частицы отклоняются защитным газом. Даже при постоянном расходе газа поток частиц, переносимых газом, перестает быть сходящимся: на ось обработки частицы не попадают (рис. 3, 4).

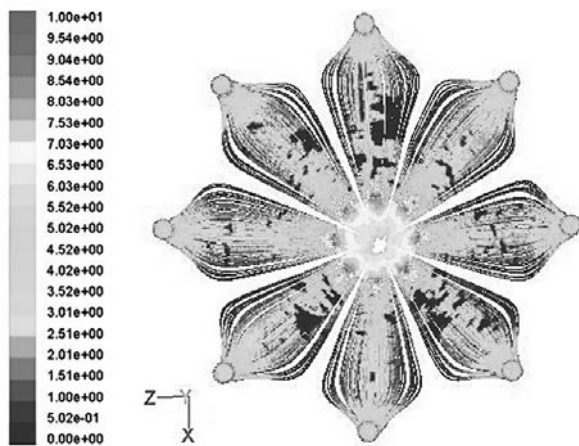


Рис. 3. Расчетный газопорошковый поток при размере частиц 20 мкм.

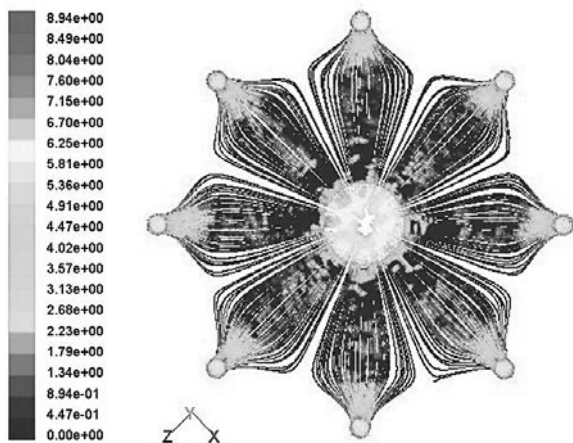


Рис. 4. Расчетный газопорошковый поток при размере частиц 10 мкм.

С учетом экспериментальных и литературных данных создана матрица планирования расчетов сопел с различными расходами газов. Поскольку в расчетной схеме присутствуют два потока: ускоряющий частицы и коаксиальный, корректирующий поток, то задание газов в комбинации позволяет изменять форму газопорошкового потока в широких пределах.

Для 8 комбинаций расходов транспортирующего и коаксиального газов был проведен расчет газодинамики и моделирование газопорошкового потока через спроектированные сопла. В качестве присадочного материала впрыскивались никелевые порошки сферической формы с размерами 10, 20, 40, 60, 80, 100 и 120 мкм. Основной целью моделирования являлось исследование влияния параметров расхода газа и размера порошковых частиц на параметры газопорошковой струи для разработки в дальнейшем технологических процессов наплавки.

Расчётным путём определяли:

1. Скорости частиц в зоне лазерного воздействия при различных параметрах струи и частиц (рис. 5).
2. Диаметр перетяжки газопорошкового потока (рис. 6).
3. Зазор между срезом сопла и центром перетяжки газопорошкового потока (рис. 7).

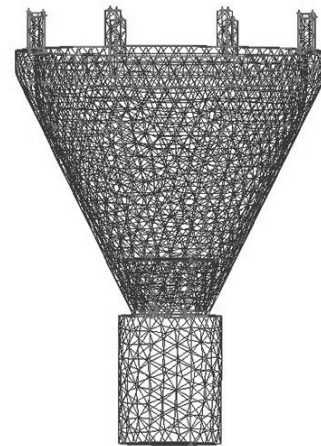


Рис. 5. Скорость частиц в области перетяжки в зависимости от их размера при различных расходах газа

На рис.5 показано, что с ростом расхода транспортирующего газа скорость частиц растет пропорционально расходу и слабо зависит от диаметра частиц в исследованном диапазоне, то есть скорость частиц в районе зоны обработки практически не изменяется при изменении размера частиц. Расчетная скорость частиц составляет от 3 до 6 м/мин для различных расходов газа и практически не зависит от скорости частиц при входе в сопло.

На рисунках 6 и 7 представлены зависимости параметров газопорошкового потока (диаметр перетяжки и зазор от среза сопла до перетяжки) от размеров частиц при различных расходах газов.

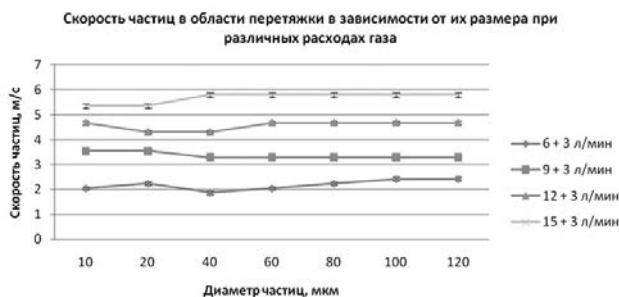


Рис. 6. Диаметр перетяжки газопорошкового потока при различных расходах газа

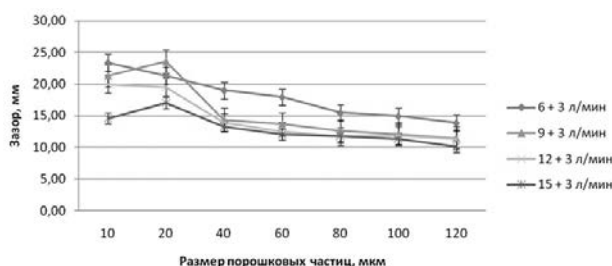


Рис. 7. Зазор от среза сопла до перетяжки газопорошкового потока при различных расходах газа

Из графиков рисунка 6 видно, что для диапазона размеров частиц от 20 до 60 мкм газопорошковый поток, состоящий из набора частиц с различными размерами, будет иметь минимальный диаметр перетяжки, равный от 2 до 3 мм в широком диапазоне расходов транспортирующего газа: от 6 до 15 л/мин.

На графиках рисунка 7 показано, что с ростом размера частиц и увеличением расхода газа зазор от среза сопла до перетяжки газопорошкового потока снижается.

Установлено, что для «длинного» сопла фракционный состав порошковых материалов от 20 до 60 мкм позволяет получить минимальный диаметр порошковой струи на обрабатываемой поверхности. Этот диаметр может составлять не более 1 мм. Выявлено, что с ростом размера частиц формирование перетяжки газопорошкового потока происходит на меньшем расстоянии от среза сопла, а конус выражен более размыто.

Для «короткого» сопла зазор изменяется более стабильно, чем для «длинного». Однако диаметр потока меняется гораздо сильнее и имеет ярко выраженный минимум диаметра порошковой струи для разных расходов газа только для частиц диаметром от 20 до 40 мкм. Это означает, что для короткого сопла применимыми являются порошки с узким диапазоном фракционного состава порошковых частиц, что накладывает серьезные ограничения на возможность нанесения композиционных покрытий.

Технологии восстановления крупногабаритных деталей подвижного состава имеют большую перспективу восстановления, поскольку позволяют экономить материал и снизить трудоемкость, необходимые для изготовления новой детали. Многочисленные работы западных машиностроителей показывают эффективность управления ресурсом деталей железнодорожной техники с помощью лазерных технологий

Разработанная оснастка позволяет получать оптимальные режимы нанесения покрытий на детали типа крестовин электровоза ЧС4. Себестоимость обработки такой детали – около 10-20% от создания новой детали, ресурс детали повышен за счет триботехнической совместимости пары трения. Кроме повышения ресурса, лазерная технология позволяет минимизировать влияние предыдущих стадий обработки детали.

Выводы

Расчетным путем установлено, что оптимальным фракционным составом частиц для газопорошкового потока являются частицы размерами от 20 до 120 мкм. Нижний предел обусловлен рассеиванием направленного потока частиц и нарушением стабильного формирования единичного валика. Верхний предел связан с нестабильностью расплавления частиц большой массы.

Расчетным путем установлено, что при угле схождения газопорошкового потока 52 градуса достигается минимальный диаметр сфокусированного газопорошкового потока, обеспечивающий минимальную ширину единичного валика, а при угле схождения в 64 градуса достигается максимальная производительность процесса лазерной модификации поверхностей, при этом ширина валика больше диаметра расплавленной лазерным лучом ванны. Наплавка порошковых материалов при оптимальных геометрических параметрах технологических насадок обеспечивает повышение ресурса деталей по сравнению с традиционными методами восстановления.

Литература

1. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки: Учеб. пособие для вузов / Под ред. А.Г. Григорьянца. – 2-е изд., стереотип. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 664 с.
2. Compact coaxial nozzle for laser cladding: US patent US2006/0065650 A1 / Wen Guo; опубл. 30.03.2006
3. Laser/powdered metal cladding nozzle: US Patent WO199520458 A1 / Buongiorno Angelo, Chromalloy Gas turbine corporation; опубл. 03.08.1995
4. Laser spray nozzle and method: US Patent US4724299 A / Albert W. Hammeke, Pennsauken N.J.; опубл. 09.02.1988.
5. Powder metal cladding nozzle: US patent US2006/0266740 A1 / Akio Sato, Yoshinori Ishikawa; опубл. 30.11.2006

6. Coaxial nozzle design for laser cladding/welding process: US patent WO2005/028151 A1 / Hu Yiping, Honeywell Int Inc ; опубли. 31.03.2005
7. Powder delivery nozzle: US patent US20080308538 A1 / James Gordon Harris, Milan Brandt; опубли. 18.12.2008
8. S.Y. Wen [и др.] Modeling of coaxial powder flow for the laser direct deposition process. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009. № 25-26. P. 5867-5877
9. N. Yang. Concentration model based on movement model of powder flow in coaxial laser cladding. Opt. Laser Technol, 2009. №41 (1), P. 94–98
10. J. Lin. Numerical simulation of the focused powder streams in coaxial laser cladding. J. Mater. Process. Technol, 2000. № 105 (1). P. 17–23
11. A.J. Pinkerton, L. Li. Modelling powder concentration distribution from a coaxial deposition nozzle for laser-based rapid tooling. Trans. ASME J. Manuf. Sci. Eng, 2004. № 126 (1). P. 33–41
12. Восстановление деталей машин напылением и наплавкой / А. И. Сидоров. М.: Машиностроение, 1988. 189 с.

Петров И.Б., Хохлов Н.И., Миряха В.А., Санников А.В., Фаворская А.В., МФТИ, г. Москва

Численное моделирование волновых и деформационных процессов в элементах железнодорожного пути

Проблема дефектоскопии железнодорожного пути является одной из важнейших при эксплуатации железных дорог. Изучение динамических процессов, происходящих в этих конструкциях, может производиться как экспериментальными, так и расчётно-теоретическими путями. Однако наилучший путь решения задачи безопасности железнодорожных конструкций – это численный расчёт волновых и деформационных процессов, а также прогноз появления повреждений в них и сопоставление с экспериментальными результатами датчиков для дальнейшего решения обратной задачи.

В работе представлен ряд численных экспериментов, среди которых:

1. Распространение ультразвуковых волн в профиле рельсов с горизонтальным расслоением головки [1] (Рис. 1). Исследовалось влияние размера области расслоения на амплитуду принимаемого датчиком сигнала.
2. Расчёт волновой картины напряжений в железнодорожной насыпи при наличии каверны [2] (Рис. 2).
3. Определение прочности рельсов с внутренней поперечной трещиной в головке (Рис. 3). Проведено качественное сравнение результатов эксперимента.

Натурные эксперименты по определению прочности рельсов [3] при переходе усталостного разрушения в хрупкий долом проводятся в ОАО «ВНИИЖТ», и в данной работе эксперимент был повторен численно в двумерной постановке.

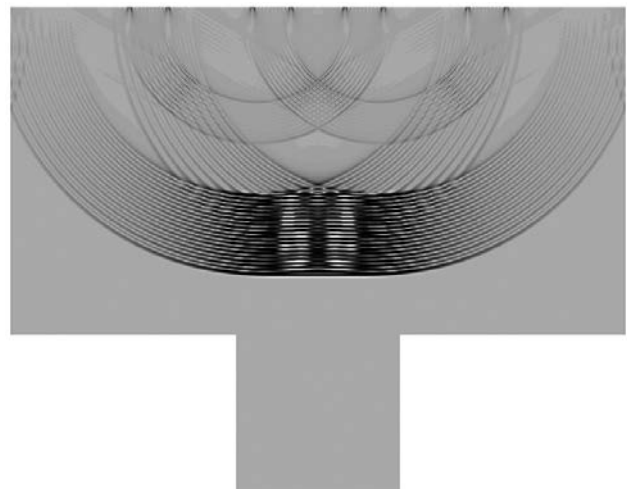


Рис. 1. Волновая картина в неповрежденном рельсе

Все расчёты были произведены с использованием разрабатываемого программного комплекса, в основе

которого лежат сеточно-характеристический метод [4] и разрывный метод Галеркина [5]. Решалась полная замкнутая система уравнений механики сплошных сред (система уравнений состояния бесконечно малого объема сплошной линейно-упругой среды). Для разрушения используются критерий максимального главного напряжения и критерий Мизеса. Модель разрушения описана в [6].

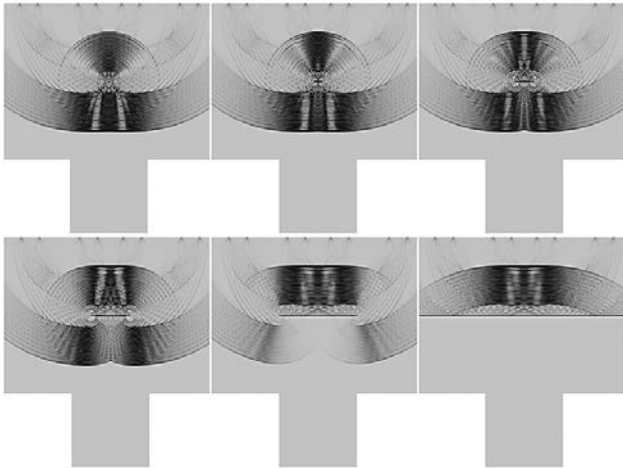


Рис. 2. Формирование отклика от горизонтального расслоения головки рельса при различных длинах трещин.



Рис. 3. Зависимости показаний приёмника от времени для всех исследуемых длин трещин, в мм.

1. Распространение ультразвуковых волн в профиле рельсов с горизонтальным расслоением головки

Пьезоэлемент, возбуждающий сигнал, моделировался с помощью приложения к площадке размером 15 мм на горизонтальной поверхности головки рельса внешней силы, изменяющейся по синусоидальному закону (длина волны излучателя составляет 1 мм, частота излучателя равняется 6.25 МГц). Амплитуда внешней силы – 1 Н. Начальная фаза – 0. Материал рельса –

сталь, с параметрами $\lambda=146,1 \cdot 10^9$ Па, $\mu=79,3 \cdot 10^9$ Па, $\rho=7,8 \cdot 10^3$ кг/м³, $c_p=6250$ м/с. Гармонический сигнал модулировался прямоугольным меандром, длительностью, равной 10 периодам.

Приемник сигнала предполагался точечным и расположенным на поверхности головки рельса на оси симметрии. Приемник сигнала измерял компоненты скорости. Расчет выполнялся в двумерной постановке. Использовалась структурированная сетка с 3,1·10⁶ квадратных ячеек. Использовался сеточно-характеристический метод.

На Рис.1-2 приведены результаты численного моделирования распространения ультразвуковых волн в профиле железнодорожного рельса. Предполагалось наличие растущего дефекта с кодом 30Г [1] (горизонтальное расслоение металла головки рельса) ровно по середине головки рельса. Расслоение располагалось на расстоянии 20 мм от поверхности головки и моделировалось с помощью свободной границы. Исследовалась различная длина трещин: 1 мм, 2 мм, 5 мм, 7 мм, 10 мм, 12 мм, 15 мм, 20 мм, 25 мм, 40 мм и 74 мм. На Рис. 1 представлена волновая картина в неповрежденном рельсе, на Рис.2 (слева направо, сверху вниз) – отраженная от дефекта волна при длине трещины 1 мм, 2 мм, 5 мм, 10 мм, 20 мм, 74 мм.

На Рис. 3 приведены зависимости синтетических данных приёмника (вертикальная компонента скорости) от времени для всех исследуемых длин трещин. Можно обратить внимание, что начиная от длины трещины 5 мм амплитуда отраженного сигнала существенно не меняется, только незначительно увеличивается для 7 мм и 10 мм, что связано с размером и положением пьезоэлемента.

2. Расчёт волновой картины напряжений в железнодорожной насыпи при наличии каверны

В данном расчёте был произведён численный анализ волновых деформационных процессов, происходящих в железнодорожной насыпи с включением каверны. Воздействие колёсной базы железнодорожного состава моделировалось с помощью внешней силы, приложенной на расстоянии 1 м на контактные пятна колёс и рельсов. Получены волновые картины напряжений. На Рис.4 изображён фрагмент двумерной расчётной сетки, который включает в себя рельс, шпалы, подстилающее покрытие (насыпь) и карстовую полость в нём. Сетка строилась в вертикальном сечении, проходящем через один из рельсов. Цветом показано давление. Полученные в данном расчёте численные параметры могут быть далее проанализированы с целью прогнозирования рисков, связанных с развитием подобных дефектов в насыпи и их выявления.

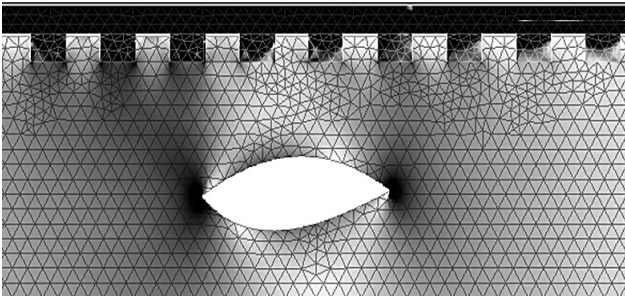


Рис. 4. Фрагмент расчётной сетки и волновая картина напряжений в железнодорожной насыпи с каверной.

3. Определение прочности рельсов с внутренней поперечной трещиной в головке

На Рис. 5 представлена схема проводимого эксперимента: на двух неподвижных опорах, расстояние между которыми 1 м, расположен кусок рельса со сформировавшимся усталостным дефектом. К рельсу сверху посередине через индентор прикладывается нагрузка, величина которой линейно возрастает. Целью эксперимента было определить зависимость минимального напряжения, при котором наступает разрушение, от размера и положения начального дефекта. Т.к. задача относится к классу долгосчетовых, т.е. общее время интегрирования много больше характерного волнового времени, то для ускорения моделирование было проведено на достаточно грубой расчётной сетке, что может гарантировать только качественное совпадение результатов.

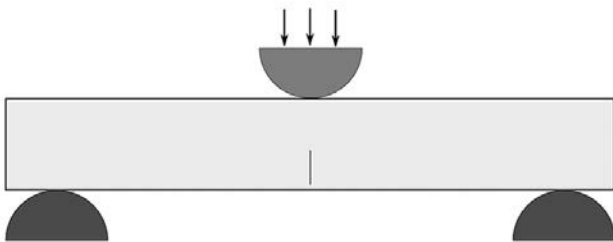


Рис. 5. Определение прочности рельсов с внутренней поперечной трещиной в головке. Схема численного эксперимента.

На Рис. 6 показана картина напряжений в рельсе, инденторе и опорах, причём цветом показана только положительная составляющая компоненты σ_{xx} , что соответствует напряжению растяжения (предел прочности на сжатие на порядки больше предела на растяжение). Концы трещины представляют собой концентраторы напряжения, поэтому и разрушение наблюдается начи-

ная с этих мест. По границе трещины наблюдается область разрезания. Особенности в этой области связаны с грубостью расчётной сетки.

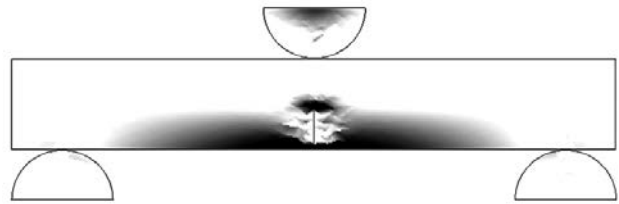


Рис. 6. Картина положительных напряжений σ_{xx} при определении прочности рельса с усталостным дефектом.

В дальнейшем планируется решить задачу в квазистатической постановке, что значительно уменьшит время счёта и позволит использовать более мелкую расчётную сетку.

Литература

1. Петров И. Б., Фаворская А. В., Миряха В. А., Хохлов Н. И., Голубев В. И., Санников А. В. Мониторинг состояния подвижного состава с помощью высокопроизводительных вычислительных систем и высокоточных вычислительных методов. // Математическое моделирование. - 2014 - Т. 26 - № 7.- С. 19 - 32.
2. Фаворская А. В., Голубев В. И., Миряха В. А., Хохлов Н. И., Санников А. В., Петров И. Б., Беклемышева К. А. Динамическая диагностика элементов пути. // Журнал «Техника железных дорог». - № 4 (24) - С. 82 - 95.
3. Шур, Е.А. Повреждения рельсов.- М.: Интекст, 2012.- 192 с.
4. Петров И.Б., Холодов А.С. Численное исследование некоторых динамических задач механики деформируемого твердого тела сеточно-характеристическим методом // Журн. выч. мат. и мат. физ. - 1984. - Т. 24. № 5. - С. 722-739.
5. В.А. Миряха, А.В. Санников, И.Б. Петров Применение разрывного метода Галеркина в задачах механики деформируемого упругого тела на неструктурированных сетках с использованием высокопроизводительных вычислительных систем // Математическое моделирование. - 2014. (в печати)
6. И. Б. Петров, Ф. Б. Челноков Численное исследование волновых процессов и процессов разрушения в многослойных преградах // Ж. вычисл. матем. и матем. физ., т. 43, № 10, с. 1562–1579 .

Давыдов Б. И., ДВГУПС, г. Хабаровск

Концепция двухэтапности процесса адаптивного управления движением грузовых поездов

1. Введение

Реформирование Российских железных дорог актуализировало задачи повышения экономической эффективности перевозочного процесса. В первую очередь, это касается грузовых перевозок по магистральным железнодорожным линиям. Концепция разрабатываемой интеллектуальной транспортной системы предполагает использование адапционных механизмов в качестве одного из главных принципов построения системы управления.

Адаптивное диспетчерское управление движением поездов предполагает корректировку графика движения в реальном времени, что обеспечивает профилактику его нарушений или ликвидацию последствий уже возникших сбоев. Оперативное регулирование движения потока грузовых поездов отличается от управления пассажирскими поездами отсутствием жестких требований пунктуальности прохождения контрольных точек их маршрутов. На первый план выходят показатели экономической эффективности пропуска потока.

Методология процесса выработки и реализации оперативных регулировок в диалоге диспетчера и интеллектуальной системы поддержки (СППР) разработана недостаточно. Это касается, в первую очередь, регулирования движения грузовых поездов. Причинами являются отсутствие адекватного целеполагания при определении оптимальных решений, а также разобщенность детерминированного и стохастического подходов при моделировании процесса движения поездов по участку железной дороги. Настоящая работа восполняет указанные пробелы в теории адаптивного управления движением.

2. Состояние проблемы адаптивного управления движением поездов

Большинство опубликованных работ по проблеме оперативного перепланирования движения поездов при возникновении нарушений графика основано на детерминированных моделях функционирования участка железной дороги. Основными видами задач, которые решаются в процессе поиска оптимальных регулировок, являются задачи обнаружения, разрешения конфликтов (CDR) и согласования скорости движения поездов (TSC) [1-3].

Поскольку большинство работ исследует алгоритмы корректировки пассажирского движения на загруженных линиях, в качестве критерия при реше-

нии оптимизационных задач используются показатели пунктуальности – задержки поездов относительно графиковых точек прихода их на станции или платформы. Как правило, рассматривается суммарная величина опоздания по всем поездам в заданный период времени. Работы, в которых пытаются использовать экономические показатели качества функционирования железнодорожной сети при пропуске пассажирского поездотока [4, 5], так или иначе, интерпретируют опоздания поездов. Поиск перепланировочных графиковых решений, минимизирующих опоздания поездов, производится путем построения дискретных моделей движения и использования методов целочисленного или частично-целочисленного линейного программирования (например, [6, 7]).

Исследований, которые используют при решении локальной оптимизационной железнодорожной задачи в явном виде экономический критерий – величину прибыли или расходов, – автору не известно. В некоторых работах лишь высказывается идея оценивания результата каждого из регулировочных мероприятий на основе анализа эксплуатационных затрат.

К основным работам, в которых используется статистический подход к анализу движения поездов с задержками можно отнести [8-10]. В указанных статьях используют различные модели, описывающие частоту возникновения и продолжительность неграфиковых задержек. Аналитический расчет распределения вторичных задержек как композиции индивидуальных распределений в указанных работах не производится.

Основным недостатком детерминированных моделей, используемых при поиске рациональных диспетчерских решений, является отсутствие учета риска возникновения случайных возмущений. Это приводит к исключению ряда регулировок, которые позволяют наилучшим образом осуществлять профилактику возможных отклонений от графика и избежать экономических потерь. Указанный недостаток в значительной степени компенсируется, если использовать стохастические модели в дополнение к детерминированным.

3. Критерий поиска оптимальных регулировочных решений

В качестве оценки результата деятельности участка дороги предложено [11] использовать разность доходов и расходов по пропуску потока грузовых поездов, исчисляемую в границах участка. Эту величину – эко-

номический результат функционирования участка - условно называют локальной прибылью Π , понимая ее как часть полной прибыли компании-оператора (владельца инфраструктуры), которая соотносится с вкладом рассматриваемого конкретного участка железной дороги в пропуск потока грузовых поездов [12]:

$$\Pi = D - P,$$

где D - доля дохода компании, приходящаяся на данный участок;

P - расходы по пропуску поездов по участку.

Размеры доходной и расходной частей, в общем случае, нелинейно зависят от интенсивности n потока грузовых поездов. Определено, что функция зависимости прибыли от интенсивности потока, в которую входят соответствующие коэффициенты нелинейности A и B :

$$\Pi(n) = [d_0 - p_0(A - B)n] - P^{ном}$$

имеет максимум при определенном значении n^M (рис.1). На конечном участке зависимости $\Pi(n)$ прибыль превращается в убыток.

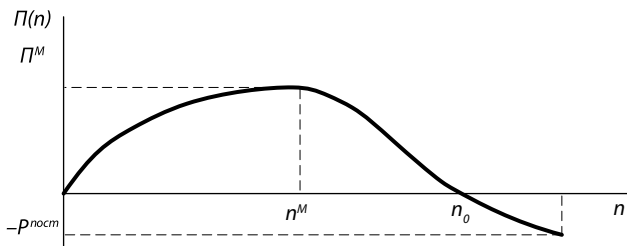


Рис.1. Зависимость показателя локальной прибыли от интенсивности потока поездов

На основе описанной модели сформулирован критерий экономической оценки действий, направленных на рациональные пропуск и обслуживание каждого грузового поезда (и потока поездов) в границах участка дороги. Возникающие затруднения в формировании и пропуске поездов приводят к изменению экономического результата. Доходная часть может уменьшиться на величины ΔD в случае применения штрафных санкций за задержку доставки груза. Расходная часть увеличивается на ΔP вследствие дополнительных потерь, возникающих при преодолении сбоев в процессе перевозки.

Очевидно, диспетчерская система в состоянии влиять лишь на динамичную часть перевозочного процесса. Поэтому оценку экономического выигрыша $\Delta \Pi$ от регулировочного мероприятия можно проводить в соответствии с выражением, из которого исключены условно-постоянные компоненты:

$$\Delta \Pi = (\Delta D_2 - \Delta D_1) - (\Delta P_2 - \Delta P_1),$$

Где $\Delta D_1, \Delta P_1$ - зависящие части доходов и расходов при использовании варианта регулировки №1;

$\Delta D_2, \Delta P_2$ - то же по варианту регулировки №2.

4. Двухэтапный процесс адаптивного управления движением грузовых поездов

Существующие методики диспетчерского управления движением на участке дороги решают указанную задачу адаптивирования к складывающимся условиям следующим образом. В процессе предварительного (*off-line*) планирования строится оперативный график движения на ближайшие сутки с учетом «окон», ограничений скорости, ожидаемого подхода грузовых поездов и др. На протяжении диспетчерской смены график корректируется с целью устранения влияния текущих отклонений, обусловленных спорадическими задержками (отменами) поездов, затруднениями в работе станций и др. Процесс корректировки в режиме реального времени (*on-line*) является одноэтапным, опирается на детерминированную модель и один из методов поиска оптимальных решений. В известных методиках решения графической задачи (в том числе, в реальном времени) используются критерии пунктуальности, что вполне оправдано на дорогах с исключительно пассажирским движением.

Новая концепция управления, предложенная в настоящей работе, предполагает наличие двух этапов адаптивирования процесса движения. Первый этап предполагает назначение режима движения потока грузовых поездов на ближайшие один - три часа. В качестве этих режимов используются интенсивный или экономичный пропуск поездов по участку дороги [11]. График движения грузовых поездов разделяется на зоны (рис.2), в которых используются специфические виды диспетчерских регулировок. Задачей адаптивного диспетчерского управления является выбор такого режима движения в каждый период времени, который обеспечивал бы наиболее эффективную работу участка. При определении временных границ между режимами решается стохастическая графическая задача. Признаком возможности введения экономичного режима является превышение межпоездным интервалом некоторого граничного значения $T_{отм}^{cp}$.

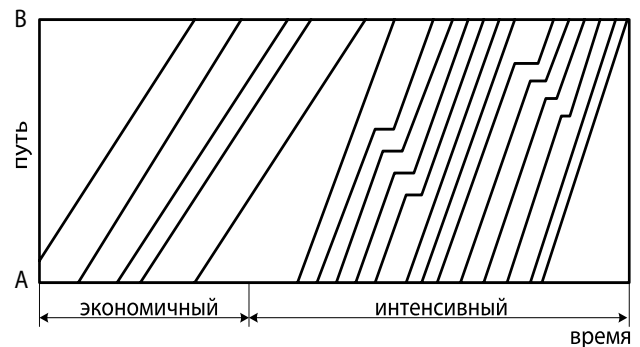


Рис.2. Пример выделения зон экономичного и интенсивного режимов управления в адаптивном графике движения грузовых поездов

Второй этап, целью которого служит корректировка траекторий движения отдельных поездов, использует детерминированную модель процесса на участке управления. В отличие от пассажирского движения, оптимизационные задачи, решаемые в процессе определения наилучших регулировочных решений по грузовым поездам, опираются на критерий экономической эффективности.

5. Механизм режимной адаптации движения грузовых поездов, 1 этап

Известно, что насыщение участка поездами, т. е. увеличение плотности поездопотока до значений, близких предельно достижимым, приводит к снижению скорости их движения. Это обусловлено как взаимовлиянием поездов в процессе их следования, так и фактором эпизодического неприятия их сортировочными и участковыми станциями. Степень сгущения подвода грузовых поездов определяется соотношением интервалов отправления поездов на участок $T_{отп}$ и прибытия на станцию $T_{пр}$. В работе [13] на основе анализа динамики вагонопотока определено условие возникновения задержек поездов (в частности, транзитных) по неприятию станциями:

$$\frac{E'_{mp} - E'_{non} - E'_{non}}{E'_{mp} - 1} \geq \frac{T_{отп}}{T_{пр}}$$

где E'_{mp} – фактически используемая емкость участка (число пропускаемых поездов);

E_{non} и E'_{non} – наличная и фактическая емкость путей приемо-отправочного парка.

Описанная закономерность служит предпосылкой для разработки такой технологии работы участка дороги, которая позволяет наилучшим образом использовать резервы времени в периоды спада интенсивности потока поездов.

Фрагментация потока грузовых поездов производится на этапе предварительного оперативного планирования, когда известны лишь интенсивность подхода и темп собственного формирования грузовых поездов в каждом часовом интервале. В указанном интервале назначается один из двух режимов пропуска поездов по данному участку: интенсивный или экономичный (энергоэффективный). Экономичный режим движения вводится при появлении возможности отправления грузовых поездов на участок с увеличенным межпоездным интервалом.

6. Условие введения экономичного режима движения поездов, этап 1

Значение граничного интервала $T_{отп}^{эп}$, при котором вводится экономичный режим, определяется на основе стохастической модели размножения задержек по цепи поездов [15]. Требуется найти минимальный интервал отправления поездов со станции А, при со-

блюдении которого вероятность $P(M^{эп} \geq k)$ того, что число вторичных остановок $M^{эп}$ будет не менее k , не превышает заданного уровня α . При формулировании задачи полагается, что все поезда обладают идентичными динамическими характеристиками. Также принимается, что характеристика рассеяния продолжительности неграфиковой остановки не зависит от места ее возникновения (в пределах данного перегона или станции). В расчете учитывается, что минимальный интервал времени попутного следования поездов (по условию безопасности) равен T_0 .

Распространение задержек по цепи поездов при возникновении первичной остановки длительностью τ_1 иллюстрируется фрагментом графика, приведенным на рис.3. При построении модели полагается, что задний поезд останавливается по красному сигналу светофора тогда, когда расстояние до впереди стоящего становится равным величине S_0 минимального безопасного расстояния, и трогается немедленно после того, как передний поезд возобновляет движение.

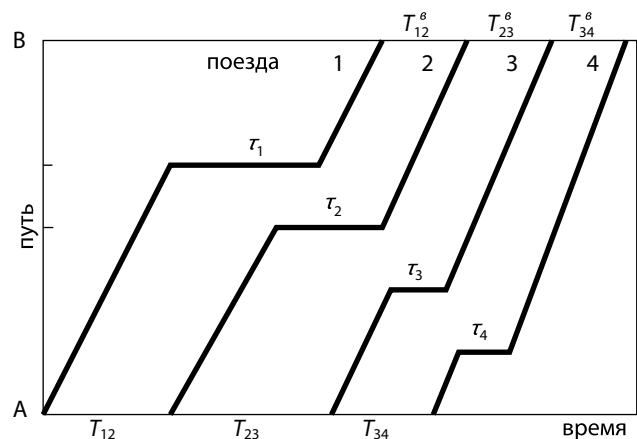


Рис.3. Механизм возникновения вторичных задержек

Очевидно, число вторичных задержек $M^{эп}$ по группе поездов зависит от распределения вероятностей размера первичных неграфиковых остановок и средней величины межпоездного интервала. Характеристика рассеяния первичных остановок $g(\tau_{неп})$ определяется на основе статистики отказов, полученной в предшествующие периоды эксплуатации данного участка дороги.

Показано, что вероятность превышения числом вторичных задержек некоторого уровня k связана с распределением вероятности первичной остановки зависимостью:

$$P(M^{эп} \geq k) = \int_{kT}^{\infty} g(\tau_{неп}) dt, \quad 1 \leq k \leq n-1$$

Используя полученное соотношение, получаем искомое значение граничного межпоездного интервала:

$$T_{отп}^{эп} = T_0 + \frac{x_{1-\alpha}}{k}$$

Где $x_{1-\alpha}$ – квантиль распределения случайной величины $\tau_{пер}$ – является решением уравнения $\alpha = \int_x^\infty g(\tau_{пер}) dt$ относительно величины x . Значение $T_{омн}^{сп}$ рассматривается как граница, которая разделяет периоды экономичного и интенсивного пропуска грузовых поездов по участку.

С целью определения вида распределения неграфиковых остановок проанализирована реальная ситуация, которая наблюдалась в определенном суточном периоде на участке Х–Б восточной части Транссибирской железнодорожной магистрали протяженностью 210 км. На этом участке возникла зона напряжений (перегоны 9–10 общей длиной 19 км). В период, когда проводились наблюдения, на этой зоне регулярно возникали кратковременные неграфиковые остановки. Определено, что распределение $g(\tau_{пер})$ является показательным с параметром $\lambda=0,26 \cdot 1/\text{мин}$.

В качестве примера рассмотрим ситуацию, когда на участке железной дороги в период сгущения потока грузовых поездов допускается возникновение не более 4 вторичных задержек с вероятностью, не меньшей 0,9. Учитывая, что безопасный межпоездной интервал для тяжеловесных грузовых поездов составляет 4 мин., получаем, что введение экономичного режима целесообразно, если можно обеспечить их отправление с исходной станции участка с интервалом не менее 5,8 мин. Увеличение интервала до 10 мин. ведет к снижению вероятного числа вторичных остановок до единицы.

7. Детерминированная задача оптимального пропуска поездов, 2 этап

Задача поиска оптимального графикового решения формулируется в общем виде как динамическая задача размещения ресурсов, в которой присутствуют ограничения по мощности [15]. В качестве критерия оптимизации используется объем финансовых затрат. Предположим, необходимо выполнить заданное число работ – пропустить n поездов – в течение определенного периода. Плановый период продолжительностью L (диспетчерская смена) разделен на интервалы равной длины, составляющие счетное множество $T=\{1, \dots, l\}$. Множество технических средств обозначим через $I=\{1, \dots, m\}$, множество работ (поездов), подлежащих выполнению за плановый период, – через $J=\{1, \dots, n\}$. Предположим, что множество I разбито на непересекающиеся подмножества $I_t, t \in T$. Долю работы поезда j , приходящуюся на i -й элемент (блок-участок), обозначим как x_{ij} .

Считаем, что заданы следующие величины:

C_{jt}^0 – накопленный начальный объем эксплуатационных затрат по j -му поезду, который отправляется на участок в интервале t ;

c_{ij} – удельный объем расхода ресурса (энергетиче-

ского или денежного) на единицу работы при следовании j -го поезда по i -му блок-участку;

C_{ij}^{ocm} – затраты на выполненную остановку j -го поезда при нахождении на i -м блок-участке;

v_{it}^0 – число технических средств (участков) i -го типа на начальный момент t -го часового интервала времени.

Дополнительный расход ресурса C_{ij}^{ocm} при выполнении остановки примем для каждого из типов поездов фиксированным.

Переменные задачи имеют следующий смысл:

$$z_{jt} = \begin{cases} 1, & \text{если в } t\text{-м интервале на участок вступает } j\text{-й поезд,} \\ 0 & \text{– в противном случае} \end{cases}$$

$$x'_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если имеется остановка } j\text{-го поезда на } i\text{-м участке,} \\ 0 & \text{– в противном случае} \end{cases}$$

$x_{ij} \geq 0$ – доля работы поезда j , приходящаяся на i -й блок-участок.

Динамическая задача выбора сценария пропуска потока поездов формулируется следующим образом:

Найти:

$$\min \sum_{t \in T} \sum_{j \in J} \left(C_{jt}^0 z_{jt} + \sum_{i \in I_t} c_{ij} x_{ij} + \sum_{i \in I_t} C_{ij}^{ocm} x'_{ij} \right)$$

при условиях:

$$\sum_{i \in I} x_{ij} = 1, \sum_{j \in J_t} p_{ij} x_{ij} \leq v_{it}^0, x_{jt} \in \{0,1\}, i \in I, j \in J, t \in T.$$

Целевая функция задачи выражает суммарные затраты на пропуск всех поездов в течение планового периода. Первое условие гарантирует полное выполнение всех работ. Второе условие ограничивает возможности выполнения работ имеющимися в наличии техническими средствами. Если в t -м интервале времени выходит из строя определенная доля s_{it} участков i -го типа, второе ограничение приобретает вид:

$$\sum_{j \in J_t} p_{ij} x_{ij} \leq v_{it}^0 - \sum_{\tau=1}^{t-1} s_{i\tau} \sum_{j \in J_t} p_{ij} x_{ij}, i \in I, t \in T.$$

Сформулированная задача динамического выбора оптимального сценария относится к числу NP-трудных задач дискретной оптимизации. Разработан ряд методов рационального поиска решений по корректировке графика движения поездов, сокращающих компьютерное время [3].

8. Потенциал улучшения экономики грузовых перевозок при использовании адаптивного управления движением поездов

Экспериментальные исследования, проведенные на ряде железных дорог, показывают, что потери электроэнергии при неграфиковой остановке тяжеловесного поезда массой 6-8 тысяч тонн достигают 300-400 кВтч. Согласно статистике, на двухпутной загруженной магистральной линии неграфиковая остановка каждого грузового поезда возникает (в среднем) каждые 3 часа его следования (на плече обслуживания 200 км). Непроизводительный расход энергии, обусловленный этим

фактором, составляет около 6% от общих затрат. Уменьшение числа остановок, по крайней мере, на половину, использование энергосберегающих режимов вождения поездов дает при существующем размере движения (к примеру, при 70 парах поездов на Транссибирской магистрали) годовую экономию энергии на каждом диспетчерском участке, превышающую 8 млн. кВтч.. Эксплуатационные затраты при этом снижаются на 25 млн. руб.

Заключение

Задачей диспетчерского персонала при изменении интенсивности грузового потока или условий пропуска по участку дороги является принятие решения о том, в каком периоде должен быть реализован режим интенсивного, в каком – экономичного пропуска потока. Признаком возможности введения экономичного режима является увеличение межпоездного интервала сверх расчетного граничного значения. При этом будут созданы условия для обеспечения минимального числа неграфиковых задержек поездов. На втором этапе адаптивного управления – этапе непосредственного регулирования движения – решение оптимизационной задачи заключается в назначении каждому поезду экономичного сегмента такого расписания, реализация которого даст минимальный расход энергетического ресурса. Добавочный резерв времени, целенаправленно вводимый в этот период, при движении поезда по диспетчерскому участку протяженностью порядка 200 километров не превышает 5 процентов от полного времени хода (10-15 мин.) Рассмотренная регулировка практически не снижает пропускную способность участка, не приводит к вынужденному оставлению части поездов на исходной станции.

Литература

- D'Ariano, A., Pacciarelli, D., and Pranzo, M. (2007) A branch and bound algorithm for scheduling trains in a railway network / *European Journal of Operational Research*, 183 (2). - pp. 643 – 657.
- Quan Lu, Dessouky, M., and Leachman, R. C. (2004) Modeling Train Movements through Complex Rail Networks / *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation* v.14. - pp. 32-76.
- Törnquist, J. (2005) Computer-based decision support for railway traffic scheduling and dispatching: A review of models and algorithms / *Proceedings of ATMOS 2005*, - Palma de Mallorca, Spain, October 2005.
- Fan, B., Roberts, C., and Weston, P. (2011) A hybrid algorithm for optimal junction traffic control / *Proceedings of the 4th International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis*. - Rome, February 16–18. – p. 65
- Semet, Y., and Schoenauer, M. (2006). On the benefits of inoculation, an example in train scheduling / *Proceedings of the 8th annual conference on genetic and evolutionary computation (GECCO '06)*. – pp. 1761–1768.
- Cordeau, J.-F., Toth, P., and Vigo, D. (1998) A survey of optimization models for train routing and scheduling / *Transportation Science*, 32(4). – pp. 380–404.
- Huisman, D., Kroon, L., Lentink, R., and Vromans, M. (2005) Operations research in passenger railway transportation / *Erasmus Research Institute of Management (ERIM)*. Research paper № ERS-2005-023-LIS.
- Vansteenwegen, P., and Van Oudheusden, D. (2007) Decreasing the passenger waiting time for an intercity rail network / *Transportation Research, Part B: Methodological*, Vol. 41, Issue 4, May. – pp. 478-492.
- Ho, T. K., and He, Y. Q. (2008) Evaluation on service quality of railway timetable / *Proceedings of the 6-th International Conference on Traffic and Transportation Studies*, 5-7 August 2008. - Nanning.
- Carey, M., and Kwicinski, A. (1994) Stochastic approximation to the effects of headways on knock-on delays of trains / *Transportation Research, Part B*, 28 (4). – pp. 251-267.
- Давыдов, Б. И. Экономически эффективное управление движением поездов / Б. И. Давыдов // *Экономика железных дорог*, 2012, №3. - С.28-37
- Гапаненок В. И. Экономика графика / В. И. Гапаненок, С. С. Жабров, Ю. В. Попов // *Железнодорожный транспорт*, 2006. № 5. - С. 24–28.
- Климанов, В. С. Вопросы оперативного регулирования поездопотоков на направлении / В. С. Климанов // *Дисс. к.т.н.* - Москва, 1982. – 213 с.
- Davydov, B. (2014) Optimal rescheduling for the mixed passenger and freight line / *Proceedings of the 14th International conference on Railway Engineering Design and Optimization. COMPRAIL 2014*. Rome, 24-26 June 2014.
- Кочетов, Ю. А. Методы локального поиска для дискретных задач размещения / Ю. А. Кочетов // *Дисс. д-ра физ. мат. наук.* – Новосибирск, 2009. - 267 с.

СЕКЦИЯ №3

УПРАВЛЕНИЕ ИНФРАСТРУКТУРОЙ. СПУТНИКОВЫЕ И ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В УПРАВЛЕНИИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Розенберг И.Н., ОАО «НИИАС», Москва

Системная интеграция базовых технологических элементов ИСУЖТ в задачах управления инфраструктурой и обеспечения безопасности движения

Три года назад мы взяли курс на создание в ОАО «РЖД» интеллектуальной системы управления железнодорожным транспортом (ИСУЖТ), имея целью перейти от автоматизации отдельных технологических или управленческих операций к созданию комплексной системы, позволяющей управлять производственными процессами в реальном масштабе времени, осуществлять комплексное планирование и текущее регулирование деятельностью железнодорожной отрасли.

Мы начали создавать ИСУЖТ как информационно-управляющую систему, построенную на принципах системной интеграции современных информационных и телекоммуникационных технологий, методологии искусственного интеллекта и экспертных систем, инновационных разработок в моделировании и регулировании транспортных потоков.

Научно-методологической базой этих работ стали результаты исследований по совместной программе Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) и ОАО «РЖД», а также разработки ведущих научно-исследовательских организаций и высших учебных заведений в системах РАН, железнодорожной отрасли, а также различных министерств и ведомств страны.

Особенностью развертывания работ по созданию ИСУЖТ стало то, что они совпали с периодом структурного реформирования железнодорожной отрасли, когда существенная часть производственно-хозяйственного комплекса ОАО «РЖД» перешла к общесетевым филиалам/дирекциям по вертикально-структурированным направлениям деятельности, включая предоставление транспортных услуг, управление движением, тягу, ремонт тягового подвижного состава, эксплуатацию и ремонт инфраструктуры.

Структурная реформа Компании не могла не вызвать возникновения определенных конфликтов в сфере несоответствия бизнес-интересов центральных функциональных дирекций с бизнес-интересами ОАО «РЖД» в целом.

Как следствие, перед разработчиками ИСУЖТ встала задача пересмотра методологической и системно-технической базы управления всем производственным циклом с целью создания инструментов, обеспечивающих эффективное взаимодействие дирекций управления движением, тяги, инфраструктуры, компаний-операторов и других участников перевозочного процесса для выполнения принятого плана перевозок и оптимизации затрат на всех этапах.

Появилась необходимость скорейшего формирования интеграционной технологической платформы ИСУЖТ (рис. 1), способной объединить все доступные источники данных о ходе производственных процессов, обеспечить быстрый доступ задействованных в непрерывном производственном процессе прикладных систем к требуемой информации, создать условия для реализации комплексной динамической модели перевозочного процесса на сети железных дорог ОАО «РЖД».

Приступая к созданию технологической платформы ИСУЖТ, мы опирались на принятый руководством Компании в 2012 году Единый сетевой технологический процесс (ЕСТП), нацеленный на эффективную организацию технологического взаимодействия различных структур и предусматривающий создание комплекса взаимодействующих автоматизированных систем и баз данных, обеспечивающих информационную поддержку по всем элементам организации перевозочного процесса в ОАО «РЖД», а также взаимодействие с грузоотправителями, грузополучателями, операторами железнодорожного подвижного состава.



Рис. 1.

Реально оценивая все сложности преодоления «узких мест», возникших вследствие имеющей место в Компании «лоскутной автоматизации» в виде большого количества автоматизированных информационных (но не управляющих!) систем по различным хозяйствам и функциональным приложениям, мы приняли решение о поэтапной реализации ИСУЖТ на основе вычленения первоочередных направлений и базовых элементов формируемой технологической платформы.

При этом в качестве первоочередных направлений мы выбрали интеллектуализацию управления подвижным и тяговым составом, станционную работу, обеспечение безопасности движения и управление инфраструктурой.

Базовые элементы технологической платформы ИСУЖТ были определены нами как набор технологических модулей, позволяющих реализовать:

- работу в реальном масштабе времени;
- создание единого координатно-временного и информационного пространства на сети железных дорог ОАО «РЖД»;
- пространственную и временную синхронизацию всех реализуемых в Компании бизнес-процессов,
- полную ситуационную осведомленность диспетчерского аппарата;
- объединение информации, технологических процессов и алгоритмов поддержки принятия решений в составе комплексных автоматизированных рабочих мест;
- реализацию объектно-ориентированных моделей и эффективных алгоритмы поддержки принятия решений;
- тесную интеграцию с действующими информационными системами и источниками данных.

Начав построение технологической платформы, мы, по сути дела, приступили к реинжинирингу действующих систем управления с последовательным поэтапным внедрением новых составляющих, построенных на принципах прикладных интеллектуаль-

ных систем. При этом, естественно, ставилась задача снижения расходов на эксплуатацию и сопровождение ИСУЖТ за счет устранения дублирования и синхронизации данных в существующих разрозненных информационных системах.

В качестве базовых элементов (рис. 2) на данном этапе построения технологической платформы ИСУЖТ (2012–2015 г.г.) нами были выбраны и реализованы:

1. Средства формирования единого координатно-временного и информационно-коммуникационного пространства на основе использования глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС/GPS с функциональными дополнениями. Физически это осуществляется путем развертывания вдоль железнодорожных направлений высокоточных координатных систем (ВКС), обеспечивающих точности определения местоположения объектов инфраструктуры порядка 2-5 см в режиме реального времени и первые единицы миллиметров в режиме постобработки.

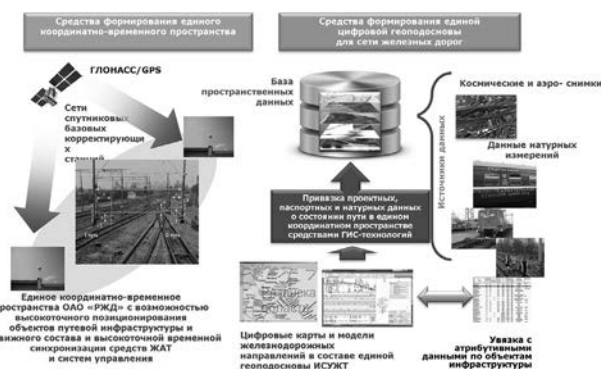


Рис. 2.

Кроме того, реализуется сервис по предоставлению точного единого времени, передаваемого со спутников системы ГЛОНАСС, для целей синхронизации работы всех устройств автоматики и телемеханики. Для обеспечения информационно-коммуникационного взаимодействия используются современные технологии цифровой подвижной связи с использованием средств обеспечения информационной безопасности.

2. Средства формирования единой цифровой геодосновы в виде комплекса геоинформационных технологий, позволяющих обеспечить: сбор, обработку и хранение пространственных данных об объектах железнодорожной инфраструктуры; построение многослойной структуры тематических слоев электронных карт с отображением графа сети железных дорог, а также цифровых моделей пути на перегонах и путевом развитии станций; создание и ведение баз пространственных данных, увязанных в едином координатном пространстве.

В состав ВКС (рис. 3) входят: сеть наземных спутниковых базовых станций дифференциальной коррекции спутниковых измерений, опорные геодезические сети (ОГС), аппаратно-программные комплексы сбора, обработки и передачи данных.

Поскольку объекты железнодорожного транспорта всегда идентифицируются своим географическим местоположением и пространственными отношениями, то указанные базовые элементы технологической платформы являются важнейшим единым поставщиком данных практически для всех функциональных приложений поддержки процессов управления как объектами подвижного состава, так и инфраструктурного комплекса Компании.



Рис. 3.

Системная интеграция указанных базовых элементов технологической платформы ИСУЖТ в виде комплекса аппаратно-программных и информационно-коммуникационных средств, информационных ресурсов и математических моделей позволяет приступить к разработке и внедрению элементов интеллектуализации в задачах управления инфраструктурой, обеспечения безопасности и управления подвижным и тяговым составом, управления станционной работой.

В области управления инфраструктурой разработанные средства технологической платформы позволяют осуществить отображение и однозначную привязку к высокоточной координатной системе (ВКС) любых объектов инфраструктуры с указанием их проектных, паспортных и текущих параметров на всех стадиях жизненного цикла (рис. 4), включая проведение инженерных изысканий, проектирование, строительство, техническое содержание и ремонт.

Обеспечивается формирование взаимосвязанных в едином координатном пространстве цифровых моделей пути (ЦМП) на перегонах и путевом развитии станций, а также 3-D моделей путевого развития и инженерных сооружений, включая объекты путевого хозяйства, системы электроснабжения, железнодорожной автоматики, телемеханики и связи.

Все полученные пространственные данные об объектах инфраструктуры с координатной привязкой к единой ВКС вносятся в цифровые базы данных создаваемой в настоящее время в ОАО «РЖД» комплексной системы пространственных данных инфраструктуры железнодорожного транспорта (КСПД ИЖТ). Сравнение фактического положения с исходными проектными параметрами позволяет реализовать управление путевыми машинами при постановке пути в проектное положение (рис. 5).



Рис. 4.

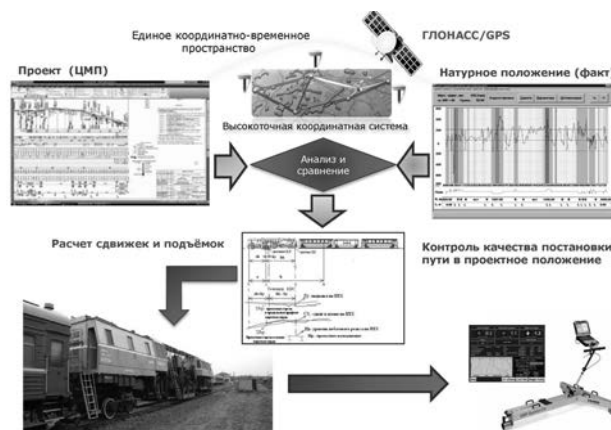


Рис. 5.

С использованием современных средств мониторинга состояния железнодорожного пути, включая путеобследовательские комплексы, диагностические лаборатории и другие технические средства осуществляется периодическое обновление фактических данных о натурном состоянии объектов железнодорожной инфраструктуры, создавая основу для принятия управленческих решений по проведению ремонтов по фактическому состоянию.

В области обеспечения безопасности и управления движением подвижного состава разработанные средства технологической платформы позволяют осуществить:

- контроль местоположения и параметров движения любых объектов подвижного состава на сети желез-

ных дорог с их автоматической идентификацией на основе применения спутниковых технологий ГЛОНАСС/GPS, наземных комплексов на основе RFID-технологий, средств цифровой связи со стандартизованными технологиями идентификации, навигации и позиционирования, телематического мониторинга и видеонаблюдения транспортных средств и грузов;

- сбор объективной информации о текущем состоянии транспортной сети железных дорог и объектах подвижного состава в реальном масштабе времени в едином координатно-временном и информационном пространстве с минимизацией влияния человеческого фактора;
- обработку полученной информации с целью принятия решений по управлению движением железнодорожного транспорта с учетом требований по организации путевого процесса, безопасности движения, содержания и технического обслуживания путевой инфраструктуры;
- реализацию эффективных алгоритмов поддержки принятия решений на основе математического моделирования соответствующих технологических процессов перевозочного процесса и складывающихся ситуаций;
- передачу управляющих сообщений пользователям транспортной сети железных дорог с использованием эффективных средств подвижной цифровой технологической связи.

Наличие предоставляемых технологической платформой возможностей создало условия для перехода к целевым разработкам по интеллектуализации конкретных приложений в следующих прикладных задачах. Создание нового поколения бортовых устройств безопасности (рис. 6) для «интеллектуального поезда» со встроенной системой автоведения и самодиагностики. Имеется в виду создание бортового устройства с мощной вычислительной платформой, средствами надежного автоматического определения текущего местоположения на основе комплексирования данных спутниковых навигационно-связных устройств, инерциального навигационного модуля, средств идентификации с помощью наземных радиочастотных RFID-меток и наземных считывающих устройств, средств диагностики состояния бортовых систем и механизмов.

В результате работ по данному направлению для скоростных поездов «Сапсан», в частности (рис. 7), были разработаны комплексные навигационно-связные устройства, в которых аппаратура спутниковой навигации была интегрирована с инерциальной навигационной системой (ГНСС+ИНС), что позволяет избежать потери навигационного решения в любом месте железнодорожного пути и одновременно контролировать динамические параметры движения поезда.

Базовые системно-технические решения по интеллектуализации управления поездами нашли свое практическое воплощение в построении системы управления железнодорожными перевозками «Сочи-2014» в период Олимпийских игр (рис. 8), где доказали свою эффективность.

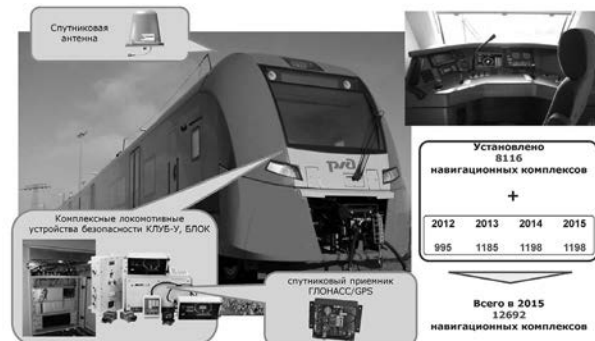


Рис. 6.

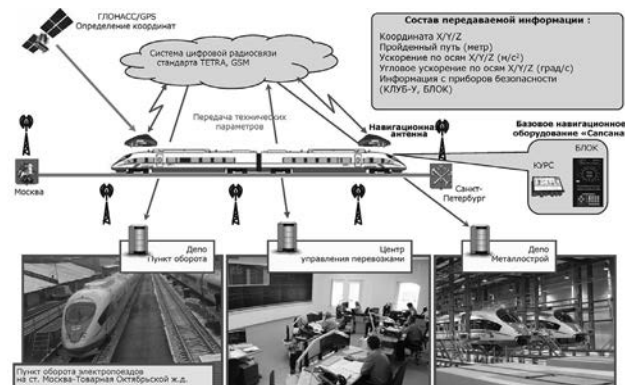


Рис. 7.



Рис. 8.



Рис. 9.

Дальнейшее развитие схема интеллектуального управления получит при реализации проекта управления движением поездов на Малом кольце Московской железной дороги (рис. 9).

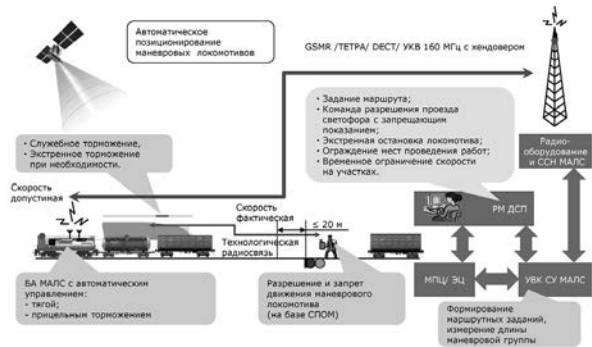


Рис. 10.

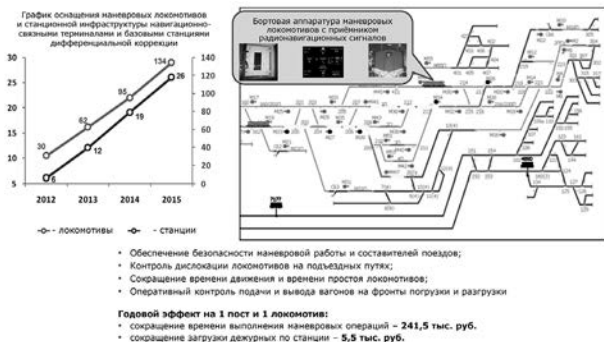


Рис. 11.

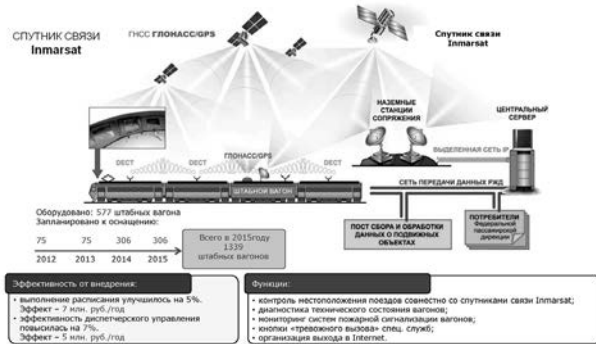


Рис. 12.



Рис. 13.

Приоритетным направлением внедрения базовых элементов технологической платформы в настоящий период явилось управление станционной работой и обеспечение безопасности движения маневровых локомотивов в составе систем ИТАУР и дальнейшего развития системы МАЛС (рис. 10).

Ключевыми задачами, которые решались в этих проектах были построение локальной ВКС, создание высокоточной цифровой модели путевого развития станции и высокоточное (с СКО не хуже 0,5 м) позиционирование на ней маневровых локомотивов, передача данных с борта средствами РОРС/GSM в центр мониторинга дислокации маневровых локомотивов, планирования и управления маневровыми перемещениями их на станции (рис. 11). Эта работа ведется с точностью до маршрутов по стрелочным переводам, при этом разрешается большое количество конфликтов, поскольку все планируемые объекты: поезда, вагоны, локомотивы позиционируются в единой высокоточной координатной системе и привязаны к единой цифровой модели путевого развития станции.

Примером эффективности применения разработанных технологических решений стала интеллектуализация диспетчерских систем управления пассажирскими перевозками (рис. 12) и интервального регулирования движения поездов в рамках организации непрерывного технологического процесса перевозки грузов.

Поскольку все указанные выше системы являются человеко-машинными и ориентированы на обеспечение бесперебойного и безопасного движения поездов при заданной пропускной способности участков диспетчерского управления, они требуют постоянного контроля местонахождения каждого поезда в едином координатном пространстве в процессе выполнения графика и полной ситуационной осведомленности в части отображения дислокации подвижного состава на единой электронной картографической основе.

В комплексе задач по созданию интеллектуальной системы диспетчерского управления основное внимание в настоящее время уделяется разработке таких функциональных приложений, как:

- своевременное выявление нештатных ситуаций и поддержка принятия решений по их преодолению;
- выявление и предупреждение отклонений от хода технологических процессов;
- реализация интеллектуального планировщика ввода поездов в график с целью повышения показателей выполнения расписания пассажирских, пригородных и грузовых поездов;
- снижение влияния человеческого фактора на качество предоставляемых диспетчерских услуг.

При создании интеллектуальной системы интервального регулирования движением поездов («без светофоров») основное внимание было уделено возмож-

ности минимизации напольного оборудования за счет применения средств спутникового позиционирования и радиоканала обмена цифровой и речевой информацией между локомотивом или штабным вагоном пассажирского поезда и диспетчерским или ситуационным центром (рис. 13).

Переход на такую систему интервального регулирования с подвижными блок-участками позволяет снизить величину межпоездного интервала на 15–20% по сравнению с автоблокировкой с фиксированной длиной блок-участков. Дополнительно становится возможным сблизить поезда на минимально возможное по условиям безопасности движения расстояние, путем плавного снижения значения допустимой скорости за счет построения в бортовом устройстве безопасности соответствующей программной кривой торможения, что очень важно для увеличения резервов регулирования времени хода поезда по перегону при сбоях в движении.

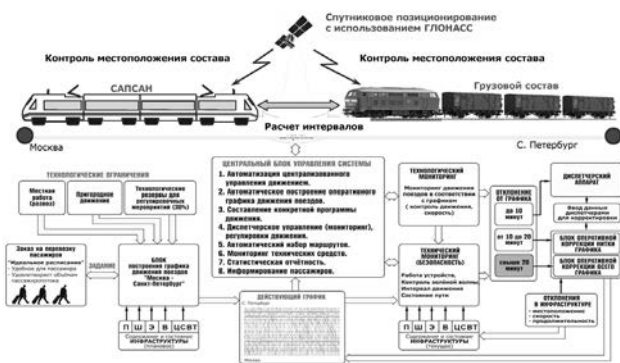


Рис. 14.



Рис. 15.

Важным шагом в развитии базовых функциональных приложений технологической платформы стала апробация их в первом прототипе комплексной системы с элементами интеллектуального управления на полигоне Москва-Санкт-Петербург-Буловская (рис. 14).

Именно здесь была развернута в полном объеме первая высокоточная координатная система на основе ГЛОНАСС/GPS с наземной сетью из 34-х базовых станций (рис. 15).

Испытания и отработка элементов интеллектуального управления на полигоне Октябрьской дороги проводились в условиях смешанного движения с наличием скоростных, обычных пассажирских, пригородных и грузовых поездов.

На базе специализированного центра диспетчерского управления был введен в эксплуатацию центральный управляющий комплекс «Интеллект» (рис. 16). Реализована схема принятия решения на основе объектно-ориентированной модели.

Перспективами развития технологической платформы ИСУЖТ на полигонах Октябрьской дороги является: интеграция с системами диспетчерской централизации для автоматической установки маршрутов и с автоведением для управления тягой. Дальнейшее тиражирование описанного решения на сеть железных дорог будет основой для перевода движения всех типов поездов по расписанию.

- Создание единого координатно-временного пространства железнодорожного транспорта на основе глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС/GPS и их дифференциальных дополнений**
- Обеспечение уровня доступности сигнала ГЛОНАСС/GPS 0,98-0,99 на всей сети железных дорог ОАО «РЖД» и точности определения местоположения ± 1 м в режиме реального времени; ± 2-3 см в режиме постобработки**
- Создание многоуровневых систем комплексной безопасности и управления движением железнодорожного транспорта**
- Обеспечение уровня охвата 100% пассажирских поездов, путевых машин, вагонно-путемашинистов и дефектоскопов, моторвагонного подвижного состава и пассажирских локомотивов в составе бортовых приборов безопасности КЛУБ-У, БЛОК**
- Создание комплексных систем геоинженерного мониторинга железнодорожной инфраструктуры и геодического обеспечения точности позиционирования объектов инфраструктуры ± 5-8 мм. Обеспечение высокоточной привязки всех видов измерений в единой системе координат, развертывание систем геоинженерного мониторинга на инженерных сооружениях (косты, туннели) и опасных природно-техногенных объектах**

Рис. 16.

- Вопросы правового и нормативно-технического развития ИТС**
 - Рассмотрение Концепции построения ИТС в транспортном комплексе Российской Федерации;
 - Рассмотрение проекта Федерального закона «Об интеллектуальных транспортных системах»
- Интеграция исследований и разработок в сфере создания ИТС и её базовых элементов**
 - Рассмотрение вопросов создания многоуровневой и многофункциональной архитектуры построения ИТС, базирующейся на использовании единого координатно-временного пространства и интервальной телекоммуникационной связи;
 - Объединяющей все виды связи и источники информации об объектах и субъектах транспортной деятельности;
- Усиление роли науки в создании инструментов интеллектуализации ИТС**
 - Создание средств и систем ситуационного контроля и прогнозирования критических ситуаций на основе методологии ситуационного управления, логико-интеллектуальных моделей, обучающихся технических систем при построении процедур управления по текущим ситуациям, использование дедуктивных систем для построения многовариантных решений и т.п.

Рис. 17.

В целом, проведенный нами комплекс исследований и разработок, а также опыт их практического внедрения позволяет сделать вывод о возможности достижения к 2015 году целевых показателей в сфере развития технологической платформы ИСУЖТ, предусмотренных Программой инновационного развития ОАО «РЖД» на период до 2015 г. (рис. 17).

Важным фактором интенсификации этих работ в структуре ОАО «РЖД» может стать активизация взаимодействия с комплексом мероприятий по созда-

нию Интеллектуальной транспортной системы (ИТС) России, проводимом под эгидой Минтранса России и Комитета по транспорту Государственной Думы Федерального Собрания РФ.

В рамках указанного комплекса мероприятий в 2015–2017 г.г. должны быть рассмотрены базовые положения и ключевые вопросы: концепции построения ИТС в транспортном комплексе Российской Федерации; проекта Федерального закона «Об интеллектуальных транспортных системах»; создания многоуровневой и многомодульной архитектуры построения ИТС, базирующейся на использовании единого координатно-временного пространства и интеграционной телекоммуникационной шины, объ-

единяющей все виды связи и источники информации об объектах и субъектах транспортной деятельности.

Отработка прикладных решений на основе системной интеграции базовых элементов технологической платформы ИСУЖТ и работ в рамках создания ИТС транспортного комплекса России позволит уже в ближайшие годы выйти на качественно новый уровень создания систем с высокой надежностью и эффективностью функционирования, обеспечить приведение уровня качества транспортных услуг и безопасности перевозок в соответствие с требованиями населения и экономики, а также лучшими мировыми стандартами.

Смирнова Е.И., Товмасын В.М., ООО «НПКФ Пратеко»

Буторин П.А., Шакирзянов Ф.Н., НИУ «Московский энергетический институт» (МЭИ)

Основные материалы и узлы двухканального оптико-электронного прибора

1. Введение

В настоящее время успешно развиваются основные составляющие оптико-электронного приборостроения: элементная база ОЭП; исследования процессов, связанных с созданием оптических сигналов, их распространением, приемом и преобразованием в электрические сигналы; теория и методы расчета отдельных узлов и приборов в целом [1-5].

Несмотря на большие успехи, достигнутые оптико-электронным приборостроением, перед этой бурно развивающейся отраслью науки и техники стоят большие и серьезные задачи. Ещё не полностью реализованы те потенциальные возможности, которыми обладают ОЭП, например, по точности, помехозащищенности и другим параметрам. Недостаточно освоены УФ и дальний ИК диапазоны оптического спектра. Для их освоения требуются новые оптические материалы, новые, более качественные приемники излучения. Отдельные элементы и узлы ОЭП сложны в эксплуатации, дорого их изготовление. Они не всегда имеют необходимые срок службы и надежность [6-8].

В этой связи разработка и изготовление макета двухканального ОЭП, сочетающего работу в видимом и дальнем ИК диапазонах с единым входным окном и выводом на дисплей единого интегрированного изображения, представляет значительный интерес.

2. Основные составные части ОЭП и материалы для их изготовления

ОЭП состоит из: собственно оптико-электронной системы, состоящей, в свою очередь, из модуля телевизионного (ТВ) и тепловизионного (ТпВ) каналов с зеркально-линзовыми объективами и модуля электронной обработки, монитора, пульта управления, блока питания.

Узлы, составляющие оптико-электронную систему, размещаются в едином корпусе, представляющим собой тубус, соединяющийся с единым входным окном с помощью фланца.

Стоит особо остановиться на материалах, из которых изготовлены модули ТВ и ТпВ и входное окно, т.к. они являются основой создания ОЭП, соответствующего поставленным задачам.

2.1. Для изготовления макетного образца двухканального ОЭП при изготовлении модулей видимого и тепловизионного каналов в качестве приемников излучения были выбраны:

- неохлаждаемая микроболометрическая матрица UL0191 форматом 324×288 с размером пикселя матрицы 25 мкм для тепловизионного канала. Для получения высококачественного изображения высокого разрешения можно применять матрицы более широкого формата 640×480 с шагом пикселей

25 мкм или формата 1024×768 с размером пикселей 17 мкм. В данном случае матрица формата 324×288 с размером пикселей 25 мкм была выбрана как наиболее распространенная и с уже накопленным опытом работы с ней.

- ПЗС (CCD) матрица ICX659AKA со стандартным размером пикселя 6,5 мкм для видимого диапазона, но можно применять высокоразрешающую HDMI.

2.2. В качестве материала входного окна был выбран оптический элемент на основе селенида цинка ZnSe (Разработка и изготовление крупногабаритных оптических элементов на основе селенида цинка для приборов дистанционного контроля, диагностики и мониторинга безаварийного состояния объектов железнодорожного транспорта, грант РФФИ, Проект № 11-08-13160-офи-М-2011-РЖД).

Как отмечалось ранее [9,10], в связи с возникшими требованиями по совмещению работы прибора от видимой до дальней ИК-области спектра (0,47–14 мкм) потребовались оптические материалы, которые являлись бы прозрачными в широком спектральном диапазоне.

Таким материалом оказался селенид цинка (ZnSe), который отличается от всех применяемых ранее оптических материалов (стекло, кристаллов) уникальным сочетанием высокой прозрачности во всем спектральном диапазоне от видимой до дальней ИК-области спектра (0,5–20 мкм) с механической и оптической прочностью, химической устойчивостью к воздействию атмосферы (рис.1).

При этом немаловажным является возможность изготовления изделий на основе ZnSe разных форм и размеров (рис.2), а также стоимость. Подробно об этом отмечалось в наших работах [9,10]. При больших габаритах оптики для ОЭП стоимость существующих материалов, в основном наиболее распространенного в настоящее время высокочистого германия (Ge), в несколько раз выше, чем у ZnSe. Например, полусфера диаметром 250-280 мм из Ge стоит около \$ 60 тыс., а из ZnSe только \$26,5.

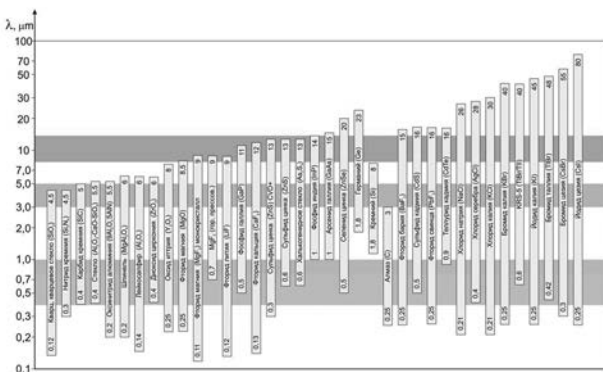


Рис. 1. Спектральный диапазон пропускания оптических материалов, применяемых в приборостроении



Рис. 2. Образцы ZnSe

За счет применения селенида цинка в качестве оптических элементов (ОЭ) входных окон достигается упрощение конструкции (для всех датчиков используется один оптический материал объектива – селенид цинка).

В связи с этим большое значение имеет разработка и создание узла входного окна на основе ОЭ из селенида цинка, за которым размещаются модули видимого и тепловизионного каналов и другие составляющие.

2.3. Узел входного окна

Основными материалами узла входного окна является ОЭ на основе ZnSe поликристаллический селенид цинка (рис. 3), металлическая оправа.

Вспомогательные материалы для сборки узла входного окна – герметик УТ-34 ТУ 38-105576-73, провода соединительные, винты невыпадающие, краска и пр.

При создании узла входного окна особое внимание было уделено выбору герметизирующих материалов, обеспечивающих совместимость деталей конструкции по физическим параметрам (в первую очередь – температурному коэффициенту линейного расширения - ТКЛР) и способам их соединения (герметизации).

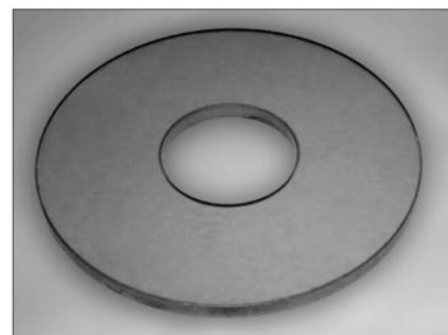


Рис. 3. Входное окно из селенида цинка

Здесь важно подобрать соответствующие составы герметика, адгезионных слоев и технологии склейки (герметизации), обеспечивающие надежность соединений и их долговечность во всем диапазоне температур, вибрации, воздействия влаги и других факторов.

При необходимости работы в широком температурном диапазоне, от -60°C до +250°C, например, в авиационной технике, количество видов герметиков, которые можно было бы применить для герметизации ОЭ из селенида цинка, резко сокращается. Наилучшие результаты были получены при использовании кремнийорганических герметиков типа У-2-28 и У-4-21 и адгезионного подслоя [11].

Для наших целей, в соответствии с предъявленными требованиями к ОЭП в целом, учитывая материал корпуса, свойства селенида цинка, был выбран герметик УТ-34 ТУ 38-105576-73.

Для установки ОЭ с нанесенным защитно-просветляющим покрытием в прибор необходимо вставить его в металлическую оправу, которая затем тем или иным способом крепится в приборе по месту. Как правило, оправка состоит из двух частей, соединяющихся между собой резьбой: обечайки, в которую вставляется ОЭ и прижимного кольца. Крепеж и герметизация ОЭ в оправе производилась с помощью герметика УТ-34 ТУ 38-105576-73 следующим образом.

Порядок сборки узла входного окна проводился в соответствии с разработанной маршрутной картой.

Сборка узла входного окна способствовала созданию структурной схемы двухканального ОЭП с размещением видимого и тепловизионного каналов на одной оптической оси и выдачей единого интегрированного изображения на дисплей (рис. 4).



Рис. 4. Узел входного окна

3. Работа макетного образца ОЭП

При наблюдении за объектами с помощью макетного образца ОЭП выбирали оптимальный режим работы, обеспечивающий наиболее четкое изображение объектов.

В дневное время суток было использовано три режима работы ОЭП:

- режим работы телевизионного канала, обеспечивающий наблюдение за объектами в видимом спектральном диапазоне;
- режим работы тепловизионного канала, обеспечивающий наблюдение за объектами в инфракрасном спектральном диапазоне по их тепловому контрасту;
- режим работы и телевизионного канала и тепловизионного канала, дающий наиболее четкое микшированное изображение объектов.

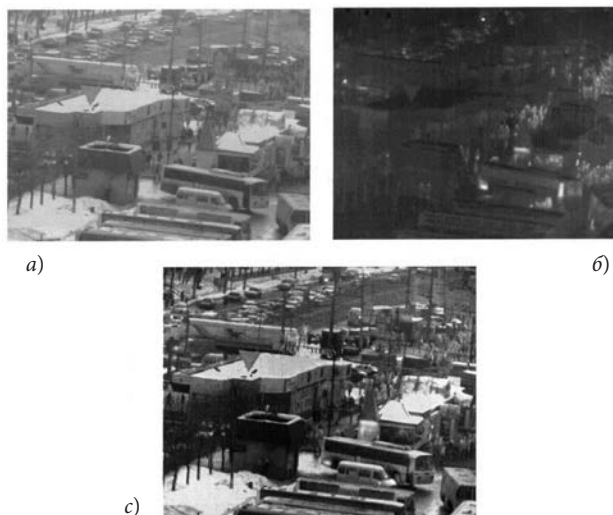


Рис. 5. Режимы работы ОЭП:

- a) при включении ТВ канала; б) при включении ТnV канала; в) при включении ТВ и ТnV каналов

Как видно из рисунков, микшированное изображение при совместной работе каналов является более контрастным и информативным за счет сложения преимуществ работы каждого канала.

4. Заключение

1. Следует сделать вывод, что проведенные работы по выбору основных материалов, разработке отдельных узлов при изготовлении макета двухканальной системы ОЭП показали возможность образцов ОЭП с одним входным окном и выводом на дисплей интегрированного (более контрастного и информативного) изображения объектов.
2. С целью повышения характеристик по дальности обнаружения/распознавания, получения более качественного изображения, его воспроизведение и передачу без помех необходимо провести оптимизацию по сборке каналов, обеспечить цифровую обработку сигнала, провести ряд испытаний на воздействие внешних условий (повышенные/пониженные температуры, дождь, снег и пр.)
3. С учетом сказанного, необходимо разработать экспериментальный образец ОЭП, который будет рекомендован для внедрения на объектах железной дороги с целью повышения безопасности жизнедеятельности людей и объектов.

Литература

1. В.В.Тарасов, Ю.Г.Якушенков. Современные проблемы инфракрасной техники. - М.: Изд. МИИГАиК, 2011. - 84 с.
2. Schiment T., Hanson C., Brady J. et al. Advances in small pixel, large format α -Si bolometer arrays. - SPIE Proc., V. 7298 (2009), P. 7298OT-1...5

3. В.В.Тарасов, Ю.Г.Якушенков Тенденции развития тепловизионных систем второго и третьего поколений и некоторые особенности их моделирования (по материалам зарубежной печати)// Оптико – электронные системы визуализации и обработки оптических изображений/ ЦНИИ «Циклон». – 2001. – Вып. 1. – с. 3–18.
4. Secundo L., Lubianiker Y., Arganat A.I. Uncooled FPA with optical reading: reaching the theoretical limit. – SPIE Proc., V. 5783 (2005), P. 483-495
5. В.В.Тарасов, Ю.Г.Якушенков. Тенденции развития инфракрасных систем «смотрящего» типа.- Специальная техника №1 (2004) стр.24-37 и №3 (2004) стр. 16 – 25.
6. Wadstromer N., Renhorn I. An information theoretic model of target discrimination using hyperspectral and multisensor data. - SPIE Proc., V.6940 (2008), P.69402H-1...12
7. Black S., Ray M., Hewitt C. et al. RVS uncooled sensor development for tactical applications. - SPIE Proc., V. 6940 (2008), P. 694022-1...9.
8. В.В.Тарасов, Ю.Г.Якушенков Многоспектральные оптико – электронные системы.. // Спец. Техника. – 2002. №4. – с. 56–62.
9. Бутырин П.А., Смирнова Е.И., Товмасын В.М., Шакирзянов Ф.Н. Разработка и изготовление крупногабаритных оптических элементов на основе селенида цинка для приборов на основе селенида цинка для приборов дистанционного контроля, диагностики и мониторинга безаварийного состояния объектов железнодорожного транспорта. Труды Третьей российской конференции «Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения» УКИ'12. Москва, 16-19 апреля 2012 г., стр. 120-129.
10. Бутырин П.А., Смирнова Е.И., Товмасын В.М., Шакирзянов Ф.Н. Крупногабаритные оптические элементы на основе селенида цинка для приборов на основе селенида цинка для приборов дистанционного контроля, диагностики и мониторинга безаварийного состояния объектов железнодорожного транспорта. Материалы первой научно-технической конференции «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте» ИСУЖТ-2012, Москва, 15-16 ноября 2012 г., стр. 130-138.
11. Барановская Н.Б. Проблема герметизации и герметизирующих материалов. – Сборник ВИАМ «Герметизация самолетных конструкций». 1989, с.5-11.

Попов А.М., Зайцев С.М., Лабутин Т.А., Зоров Н.Б., МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва
 Дюндин В.В., Кузнецов А.А., ОмГУПС, г. Омск

Использование лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии для оценки прочностных свойств сварных стыков рельсового пути

Ультразвуковой контроль с контактным способом ввода колебаний является основой дефектоскопии рельсового пути. Хотя серийно выпускаемые сканеры обеспечивают достаточно высокую надежность и производительность при выявлении большинства разновидностей дефектов, проблема автоматизированного контроля сварных стыков рельсового пути полностью не была решена ни на одной железной дороге мира по причине нестабильности ввода ультразвуковых колебаний в сварные стыки [1]. Кроме того, существующие методы неразрушающего контроля состояния рельсового пути не позволяют получить надежную информацию о возможном изменении химического состава в процессе эксплуатации.

Как известно, зарождение дефектов материалов обусловлено изменением химического и, как следствие, фазового состава материала. Поэтому для предупреждения появления дефектов в сварных соединениях, вызванных нагрузками, старением и коррозией, необ-

ходимо экспрессное определение химического состава и прочностных характеристик этих узлов во время их эксплуатации. Возможность сопоставления конкретных механических свойств (твердости) со свойствами лазерно-индуцированной плазмы (температура) была продемонстрирована авторами предлагаемого проекта на примере алюминиевых сплавов и сталей [2]. Эмиссионный спектр интенсивно светящейся лазерной плазмы, получаемой на поверхности или в объеме анализируемого материала, также позволяет быстро и надежно получать количественную и качественную информацию об элементном составе мишени в методе лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии (ЛИЭС) [3]. Для эффективного экспрессного контроля состава и свойств сварных стыков рельсового пути с помощью лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии необходимо исследовать фундаментальную связь между механо-прочностными свойствами высокоуглеродистых сталей, используемых для изготовления

рельс и сварных стыков, и параметрами лазерно-индуцированной плазмы (интенсивностью линий, температурой и электронной плотностью). Целью данной работы был выбор оптимальных параметров аналитических ЛИЭС измерений с целью диагностики состава и свойств сварных соединений.

Для проведения исследований использовали стандартные образцы углеродистых сталей производства ЗАО ИСО (УГ 112, УГ 0и, УГ 9и, УГ 1е, УНЛ 4В) и Института Стандартов США (NIST 663, NIST 1264а). Также были вырезаны и пронумерованы образцы из темплета железнодорожного рельса Р65 по сечению головки, шейки и подошвы (рис. 1).

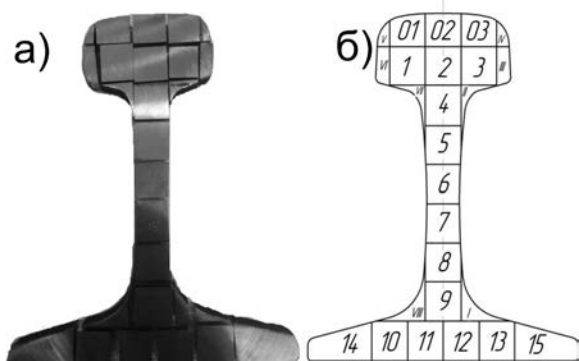


Рис. 1. Фотография темплета железнодорожного рельса Р65 (а) и схема нумерации его частей (б).

Изготовление, подготовка и исследование металлографических шлифов осуществлялась в учебно-научно-производственной лаборатории «Металловедение и структурный анализ металлов и сплавов» (МиСАМиС, ОмГУПС). Каждый элемент шлифовался, а затем полировался до зеркального блеска, после чего поверхность шлифа подвергали травлению с целью выявления полной микроструктуры. Для изменения структуры металла и его твердости была проведена термообработка части образцов (закалка и отпуск). Процесс термообработки осуществляется по данным [4]. При закалке рельсовой стали формируется мартенсит, при высоком отпуске сорбито-перлитная структура (рис. 2). Результаты определения твердости на твердомере Rockwell 574 представлены в таблице.

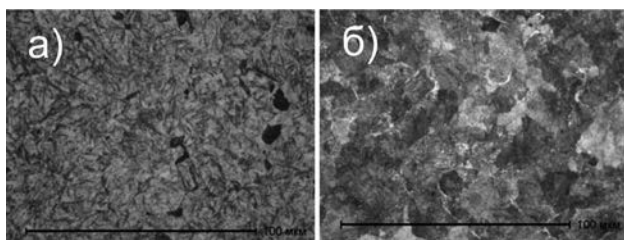


Рис. 2. Микрофотографии полированной поверхности частей 10 (а) и 12 (б) темплета рельса после термообработки. Твердость различных участков темплета железнодорожного рельса Р65.

Номер образца	Твёрдость, HRC	Твёрдость, HRC /тип термообработки
2	37,5	
3	37,1	
4	37,6	36,1/низкий отпуск
7	37,6	
10	39,2	63,1/закалка
12	38,7	32,2/высокий отпуск
14	38,9	
01	37,8	36,2/средний отпуск
02	37,3	36,1/средний отпуск

Аналитические измерения проводили на специально собранном макете прибора ЛИЭС. Излучение лазера Nd:YAG (LS-2134, $\lambda=532$ нм, 40 мДж) с помощью системы диэлектрических зеркал и кварцевых призм направляли на ахроматический фокусирующий дублет (F=15 см при 540 нм, 20 мДж). При необходимости луч лазера Nd:YAG объединялся с лучом лазера ИЛТИ-404 ($\lambda=540$ нм) с помощью поляризационного делителя пучка («поляризационного куба») в единый пучок. Изображение лазерной плазмы с помощью конденсора проецировали на щель спектрографа (HR-320, разрешающая способность 14000 для 400 нм) в соотношении 2:1, регистрация спектров осуществлялась с помощью ПЗС-камера с усилителем яркости «Наногейт-2В». Подробное описание данного макета также можно найти в работе [5].

Первоначально была проведена оценка возможности использования ЛИЭС для экспресс определения состава рельсовой стали. На основании данных базы спектральных линий NIST были выбраны диапазоны, в которых можно ожидать минимальный уровень спектральных помех со стороны железа при определении: кремния – 211-213 нм, алюминия, марганца – 389-408 нм, хрома и ванадия – 437-457 нм, титана – 443-462 нм. В качестве аналитических линий предложены Si I 212,41 нм, Al I – 394,4 нм, Cr II 455,87 нм, Mn I – 404,13 нм и V I – 437,92 нм, Ti II – 457,2 нм, соответственно. Для количественного анализа были подобраны временные параметры регистрации излучения лазерной плазмы, обеспечивающие наилучшие соотношения сигнал-фон и сигнал-шум (задержка начала наблюдения относительно лазерного импульса – 5 мкс, экспозиция – 5 мкс). Уровень содержания ванадия в образце рельсов менее 0,008%, хрома менее 0,014%, а титана менее 0,0028% (рис.3). Следовательно, рельс был изготовлен из стали М(К,Э)76. Для определения кремния, алюминия и марганца были построены градуировочные графики (рис.4), по которым было определено содержание этих элементов в образце рельса: $c(\text{Mn}) = 1,01 \pm 0,02\%$; $c(\text{Al}) < 0,01\%$; $c(\text{Si}) = 0,28 \pm 0,07$. Возможное влияние микроструктуры

и твердости было рассмотрено на примере образцов с наибольшей и наименьшей твердостью (обр. №10, 12). Найденные содержания элементов в данных образцах совпали в пределах погрешности измерений, что говорит о незначительных матричных влияниях в выбранных условиях. Поскольку углерод в значительной мере определяет свойства рельсовой стали, а для экспрессного определения на воздухе линия вакуумного ультрафиолета C I 193 нм не подходит, было предложено использовать линию углерода C I 833,51 нм. Однако в одноимпульсном режиме испарения данная линия не возбуждается. При двухимпульсном воздействии линия проявляется, однако она подвержена значительному эффекту Штарка, в результате чего происходит ее сильное перекрывание с линиями железа (рис. 5). Хотя двухимпульсное воздействие на пробу и позволяет создать условия для наблюдения эмиссии линии C I 833,51 нм, построение традиционной градуировки невозможно из-за спектральных помех со стороны железа. Возможным решением является применение многомерных градуировок, что является задачей отдельного исследования.

Для характеризации механических свойств стали мы предложили использовать важнейший параметр, характеризующий плазму, – электронную плотность. Для ее определения использовали широко распространенный подход, основанный на расчете Штарковского уширения линии водорода H_{α} 656,28 нм. Хотя образцы стали не содержат значительных количеств водорода, этот элемент присутствует в воздухе и его эмиссия наблюдается за счет столкновений частиц плазмы и молекул воды воздуха. На рис. 6 приведена эволюция спектра лазерной плазмы в области линии водорода и метод аппроксимации контура линии контуром Лоренца. Мы пренебрегли Доплеровской шириной линии H_{α} 656,28 нм, поскольку она на 2-3 порядка меньше по величине, чем Штарковская ширина. Помимо значительного уширения линии водорода, заметно значимое смещение центра линии для малых времен наблюдения (примерно 0,3–0,5 нм для 500 нс), что обусловлено высокой электронной плотностью плазмы (так называемое Штарковское смещение). Заметная асимметрия контура линии водорода для 500 нс вызвана также высокой электронной плотностью. Электронная плотность (в см^{-3}) по ширине Лоренцева контура может быть определена по уравнению теории Грима:

$$N_e(\text{см}^{-3}) = 10^{17} \times (w_L - w_I)^{3/2},$$

где w_L – ширина Лоренцева контура (в нм), w_I – аппаратная функция (в нм). При испарении образцов, имеющих твердость 32,1 и 63 HRC, электронная плотность для задержки 5 мкс составила $2,25 \times 10^{16}$ и $4,4 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$, соответственно, что позволяет использовать данную величину для оценки твердости с помощью ЛИЭС.

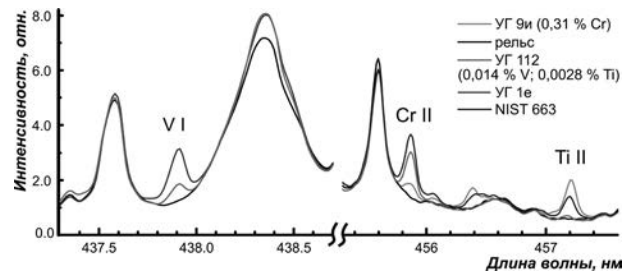


Рис. 3. Эмиссионные спектры плазмы в области аналитических линий ванадия, хрома и титана.

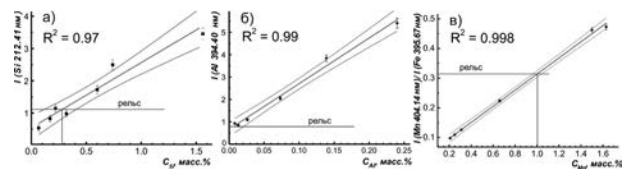


Рис. 4. Градуировочные графики для определения кремния (а), алюминия (б) и марганца (в) в образцах рельсовой стали. Тонкими зелеными линиями обозначены границы доверительного диапазона ($P=0,95$; $n=10$).

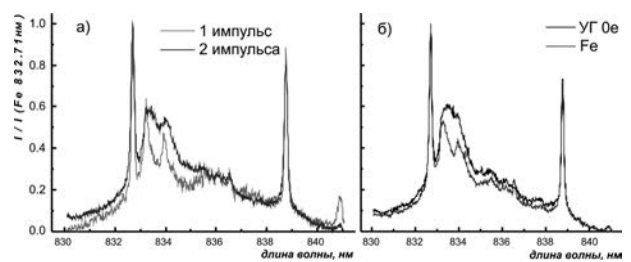


Рис. 5. Сравнение эмиссионных спектров образца стали УГ0е в области линии углерода C I 833,5 нм, полученные в двухимпульсном и одноимпульсном вариантах (а) и сравнение со спектром чистого железа (б).

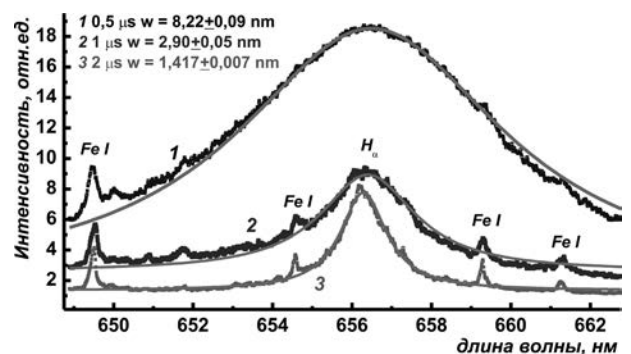


Рис. 6. Эволюция эмиссионного спектра в области линии H_{α} 656,3 нм. На вставке приведены ширины контуров линии водорода.

Таким образом, продемонстрирована возможность экспрессного определения химического состава рельсовой стали по эмиссионным спектрам лазерной плазмы. Для экспрессного количественного определения углерода в сталях впервые использована линия углерода C I 833,5 нм, удобная для его определения без вакуумирования измерительной системы.

Впервые была сопоставлена электронная плотность плазмы и микротвердость рельсовых сталей для возможности экспрессного внелабораторного зондирования механических свойств рельс. Показано наличие обратно пропорциональной корреляции этих параметров: для наименее твердого образца электронная плотность в 1,5–2 раза больше, чем для более твердого. Данный параметр лазерной плазмы можно использовать для полуколичественной экспрессной оценки твердости с погрешностью до 20%. Результаты позволят создать измерительную систему, позволяющую на месте проводить одновременное экспрессное определение химического состава (содержание углерода, кремния, фосфора, марганца, ванадия, титана, хрома, алюминия, меди и т.п.) и механических свойств (микротвердость) рельс и сварных стыков на месте.

Литература

1. Марков А.А. Зарубежные системы контроля // Путь и путевое хозяйство, 2010, №9, С.32-40.
2. Labutin T.A., Popov A.M., Lednev V.N., Zorov N.B. Correlation between properties of a solid sample and laser-induced plasma parameters // Spectrochimica Acta Part B, 2009, V.64, P.938-949.
3. Попов А.М., Лабутин Т.А., Зоров Н.Б. Использование лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии для анализа конструкционных материалов и объектов окружающей среды // Вестник Московского университета. Серия 2. Химия, 2009, Т. 50, № 6, С.453-467
4. Блантер М.Е. Теория термической обработки: учебник для вузов. М.: Металлургия, 1984. 328 с.
5. Zaytsev S.M., Popov A.M., Zorov N.B., Labutin T.A. Measurement system for high-sensitivity LIBS analysis using ICCD camera in LabVIEW environment // J. Instrum., V.9, P.P06010-P06010-18

Карабутов А.А., Подымова Н.Б., Ксенофонов Д.М., Жаринов А.Н., Бычков А.С., МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва
Бобров В.Т., Научно-исследовательский институт интроскопии МНПО «Спектр», г. Москва
Симонова В.А., Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН, г. Москва
Мальцев В.Н., Центр диагностики и мониторинга устройств инфраструктуры Московской дирекции инфраструктуры ОАО «РЖД», г. Москва

Анализ возможностей создания системы бесконтактной высокоскоростной лазерно-ультразвуковой дефектоскопии рельсов

Введение

Рельсы являются основным и наиболее дорогостоящим элементом верхнего строения пути. В процессе эксплуатации железнодорожного пути в рельсах под воздействием подвижного состава, природных и других факторов образуются дефекты и повреждения, в большей или меньшей степени угрожающие безопасности движения поездов. Дефекты в рельсах могут также образовываться на стадии их изготовления на металлургических комбинатах и при сварке на рельсосварочных предприятиях. Виды дефектов рельсов и причины их появления указаны в нормативно технической документации [1]. Основными признаками, определяющими рельсы как остродефектные, являются поперечные, продольные или наклонные трещины в головке рельсов, продольные трещины и выколы из-

за них в местах перехода головки в шейку, начинающиеся с торца рельса с одной или двух сторон шейки, трещины от болтовых отверстий и трещины в шейке рельса, а также трещины коррозионно-усталостного происхождения. Скорость развития и потенциальная опасность дефектов различных типов в рельсах еще в достаточной мере не изучены, поэтому главное в системе контроля рельсов - своевременно обнаружить и изъять из пути рельсы с особо опасными дефектами на ранней стадии их развития.

Совершенствование средств и технологии неразрушающего контроля рельсов за последние годы привело к существенному сокращению количества изломов рельсов на сети дорог ОАО «РЖД». Тем не менее, в условиях роста скоростей движения поездов и объемов

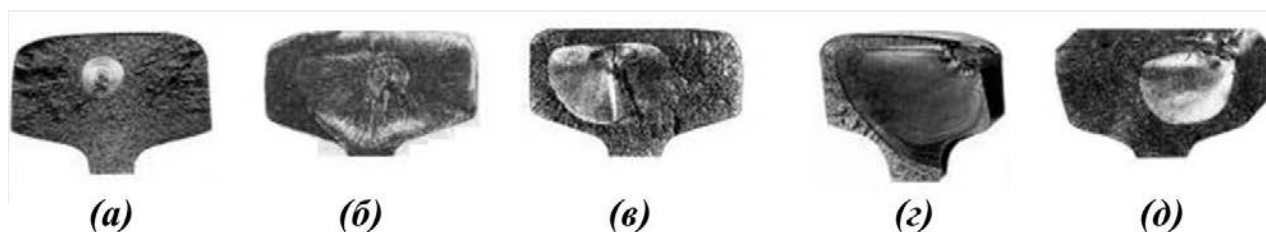


Рис. 1. Поперечные трещины в головке рельса, вызванные флокенами (а, б), газовыми пузырями (в) и связанные с низкой контактно-усталостной прочностью (г, д)

перевозок задача минимизации и предотвращения изломов рельсов по-прежнему остается актуальной. В настоящее время в России ежегодно контролируется более четырех миллионов километров рельсового пути и более двух миллионов сварных стыков рельсов. Для выявления дефектов в рельсах используются неразрушающие магнитные (индукционные) и ультразвуковые методы контроля (см., например, [2, 3]).

Целью настоящей работы является анализ возможностей создания полностью бесконтактной системы ультразвуковой дефектоскопии рельсов для выявления в них производственных и эксплуатационных дефектов на ранних стадиях. Принцип работы предлагаемой системы основан на лазерном возбуждении субмикросекундных ультразвуковых импульсов в рельсах и их высокочувствительной регистрации с помощью электромагнитного акустического преобразователя. Технические характеристики данной системы должны позволить обнаруживать особо опасные дефекты в различных частях рельсов, в частности, поперечные, сложные и поверхностные усталостные трещины, а также дефекты, не выявляемые с помощью традиционных методов ультразвуковой дефектоскопии с использованием пьезоэлектрических преобразователей.

Современное состояние исследований в области дефектоскопии рельсов

Наибольшее воздействие подвижной состав оказывает на головку рельса. Так, по статистике выход острodefekтных рельсов по сечению рельса составляет: головка рельса – 80,3%, шейка рельса – 9,7%, подошва рельса – 10%. Данные факты дают право на определение наиболее опасных дефектов в головке в виде поперечных усталостных трещин (48%), которые в определенный момент стремительно развиваются и приводят к повреждению рельсовой цепи. Источниками усталостных трещин, развивающихся в процессе эксплуатации, могут служить дефекты, возникающие при прокатке и электроконтактной сварке рельсов, например, неметаллические включения, газовые свищи, флокены (рис. 1).

В настоящее время основным методом дефектоскопии рельсов, как на стадии производства, так и в процессе эксплуатации, является метод ультразвуковой дефектоскопии [4]. Для наиболее эффективного выявления дефектов различной природы в разных частях рельса, а также дефектов различной формы и размеров разработаны и созданы многочисленные типы дефектоскопов на базе пьезоэлектрических излучателей и приемников ультразвука. В них используются различные схемы прозвучивания и алгоритмы обработки сигналов [5, 6]. Основными достоинствами таких систем являются достаточно высокая оперативность и чувствительность, многоканальность, режим непрерывного документирования результатов, возможность передачи данных на внешний компьютер и подключения к электронному блоку дополнительных периферийных устройств, контроль акустического контакта [7-9]. Однако известно, что при использовании ультразвуковых дефектоскопов на базе пьезоэлектрических преобразователей можно выявить дефекты только определенной разновидности (типоразмера). Данный факт обусловлен влиянием технических параметров системы, таких как рабочая полоса частот излучателя и приемника ультразвука, диаметр ультразвукового пучка, его диаграмма направленности и угол ввода в объект контроля, на возможности системы достоверно диагностировать дефекты определенного типоразмера. Это связано с тем, что эффективность рассеяния ультразвука на дефекте в материале существенно зависит от соотношения размера и формы дефекта и длины зондирующей акустической волны, а также от ориентации дефекта относительно зондирующего ультразвукового пучка [10]. Необходимое требование постоянного контроля акустического контакта и учета его возможных изменений при обработке сигналов также являются достаточно существенными недостатками дефектоскопов на базе пьезоэлектрических преобразователей.

Другой особенностью традиционных методик ультразвуковой дефектоскопии, в которых используются пьезоэлектрические излучатели и приемники акустических импульсов, является возможность обнаружения дефектов в изделиях из металлов только на глубинах

от нескольких миллиметров, причем минимальный размер дефектов также составляет единицы миллиметров. Это связано с наличием так называемой «мертвой зоны» излучателя - физическим ограничением, обусловленным длительностью зондирующего ультразвукового импульса и изрезанностью диаграммы направленности в ближней зоне излучаемого акустического поля. Зондирующие импульсы пьезоэлектрических излучателей, используемых в ультразвуковых дефектоскопах, имеют длительность ΔT порядка единиц микросекунд, соответственно, пространственная протяженность этих импульсов $\Delta l = C\Delta T$ (C - фазовая скорость акустических волн в объекте контроля) составляет единицы миллиметров (для оценки взята величина скорости продольных ультразвуковых волн для стали $C = 6000$ м/с, значение $\Delta T = 1$ мкс). Величина Δl по сути определяет минимальную глубину под поверхностью объекта контроля, на которой может быть обнаружен дефект, и пространственное разрешение метода дефектоскопии. Если дефект расположен на глубине $h < \Delta l$, то отраженный от него импульс будет перекрываться с зондирующим импульсом и обнаружение, а также восстановление формы и размеров дефекта будет невозможно.

Таким образом, для обнаружения дефектов различных типоразмеров в рельсах, включая особо опасные подповерхностные дефекты в головке рельса на ранней стадии их развития (когда размеры не превышают единиц миллиметров), необходимо обеспечить эффективное возбуждение и регистрацию коротких и мощных зондирующих акустических импульсов в широком спектральном диапазоне от долей до десятков мегагерц.

Методика бесконтактной лазерно-ультразвуковой дефектоскопии рельсов

Для преодоления указанных выше трудностей в настоящей работе предлагается использование лазерно-термооптического возбуждения ультразвука (оптико-акустического эффекта) [11]. Суть его заключается в возникновении импульса звукового давления при поглощении лазерного импульса в объекте контроля за счет нестационарного теплового расширения нагретого лазерным излучением приповерхностного слоя объекта. Применение термооптически возбуждаемых мощных ультразвуковых импульсов с контролируемой временной формой и широким спектральным диапазоном (отношение частот верхней и нижней границ диапазона может достигать 100) позволяет в 3-10 раз увеличить пространственное разрешение и снизить в 3-10 раз глубину мертвой зоны при тех же глубинах зондирования по сравнению с использованием пьезоэлектрических преобразователей.

В разрабатываемой системе для выявления и определения глубины залегания особо опасных подповерх-

ностных трещин в головке рельса на ранних стадиях их развития было предложено использовать в качестве зондирующих акустических волн так называемые головные продольные (поверхностно-продольные или продольные подповерхностные) акустические волны, возбуждаемые импульсным лазерным излучением в приповерхностном слое головки рельса. Головная акустическая волна – это продольная подповерхностная волна, распространяющаяся со скоростью, близкой к скорости объемной продольной волны и отличающаяся быстрым уменьшением амплитуды вследствие непрерывного переизлучения энергии в среду в виде поперечной волны. Амплитуда головной волны достигает максимального значения при распространении под поверхностью объекта под углом $\alpha \sim 75-80^\circ$ относительно нормали к поверхности объекта. Поэтому данный тип волн наиболее чувствителен к дефектам, локализованным под поверхностью исследуемого объекта на глубинах вплоть до нескольких длин волн [12,13]. В работе [14] был проведен теоретический анализ лазерного возбуждения широкополосных импульсов головных акустических волн и разработан лазерно-ультразвуковой преобразователь с контактной пьезоэлектрической регистрацией широкополосных акустических сигналов для прецизионного измерения скорости головной волны в рельсовых плетях для определения механических напряжений в них методом акустоупругости.

Для бесконтактной регистрации импульсов головных волн в настоящей работе рассматривалась возможность использования электромагнитного акустического преобразователя (ЭМАП). Сочетание преимуществ лазерной термооптической генерации мощных ультразвуковых импульсов и их бесконтактной регистрации с помощью ЭМАП находят в настоящее время достаточно широкое применение во многих задачах технической диагностики и неразрушающего контроля (см., например, [15,16]). В настоящей работе был проведен теоретический расчет геометрии и параметров ЭМАП, адаптированного для регистрации ультразвукового импульса головных волн в спектральном диапазоне 0,2-1 МГц. Показано, что для ЭМАП резонансного типа для эффективной регистрации ультразвука на частоте 1 МГц необходимо использовать высокочастотный индуктор, изготовленный в виде решетки-меандра из 6-ти проводников с шагом порядка 3 мм и шириной каждого проводника 0,5 мм; расстояние до поверхности объекта контроля 0,5 мм. Результат расчета диаграммы направленности $R(\alpha)$ такого приемника представлен на рис.2. Видно, что главный лепесток диаграммы направленности, то есть область наибольшей чувствительности приемника, оказывается максимально приближенной к поверхности объекта ($\alpha \approx 80^\circ$). Пример конструктивного исполнения ЭМАП и вариант его крепления на образце рельса показаны на рис.3.

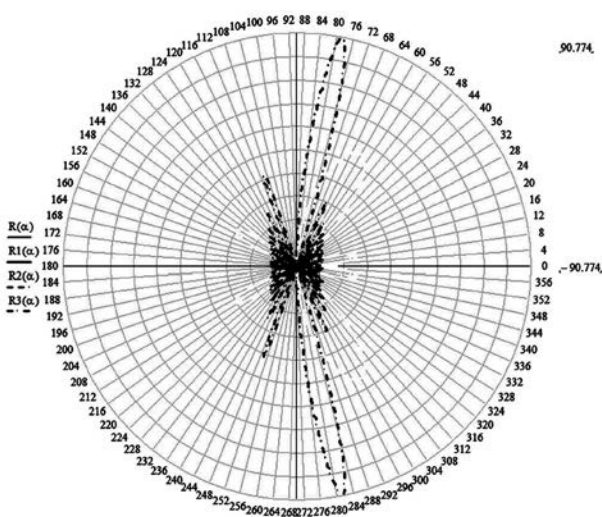


Рис.2. Результат расчета диаграммы направленности ЭМАП

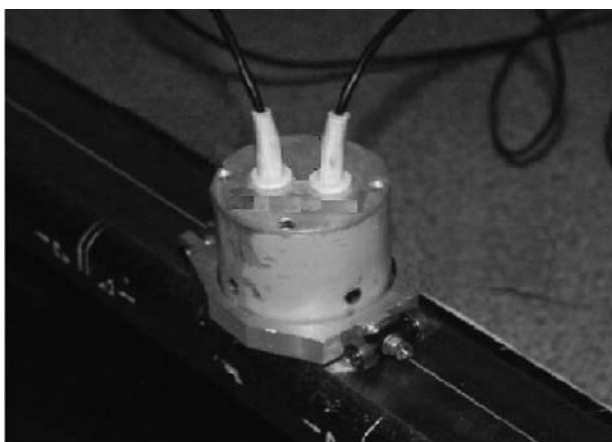
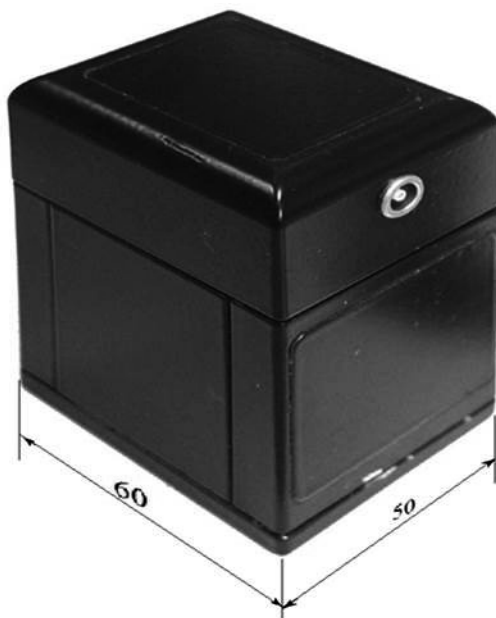


Рис.3. Вариант конструктивного исполнения ЭМАП для приёма головной волны (а) и внешний вид ЭМАП, установленного на образце рельса (б)

Принцип работы предлагаемой системы бесконтактной лазерно-ультразвуковой дефектоскопии рельсов схематически представлен на рис. 4. Поверхность головки рельса облучается лазерными импульсами через световод, конструктивно закрепленный на каретке, на которой также закреплен ЭМАП. Расстояние L_0 от места ввода лазерного излучения в объект до чувствительной площадки ЭМАП называется базой измерений. Для определения места локализации и размеров подповерхностных дефектов используется так называемый дифракционно-временной или времяпролетный метод (в англоязычной терминологии «time of flight diffraction – TOFD»).



Рис.4. Схема метода бесконтактной лазерно-ультразвуковой дефектоскопии рельсов

Метод основан на регистрации разницы δt времен прихода импульса ультразвуковых волн, рассеянного (дифрагированного) на границах дефекта, и прихода опорного сигнала - импульса, бегущего непосредственно под поверхностью объекта по кратчайшему расстоянию между источником и приемником. Зная эту разницу и значение фазовой скорости головных акустических волн C_{hd} в объекте контроля, а также величину базы измерений L_0 , можно определить глубину h залегания дефекта: $h \approx \sqrt{C_{hd} L_0 \delta t / 2}$. Минимальную достоверно измеряемую глубину h_{min} расположения дефектов под поверхностью и минимальный размер достоверно обнаружимых дефектов можно оценить по известному значению L_0 и известной длительности возбуждаемого ультразвукового импульса t_0 , исходя из условия $\delta t \approx t_0$: $h_{min} \approx \sqrt{C_{hd} L_0 t_0 / 2}$. Оценки показывают, что при величине базы измерений $L_0 = 30$ мм и длительности возбуждаемого ультразвукового импульса $t_0 \sim 100$ мкс значение h_{min} составляет около 3 мм.

Если дефект будет расположен ближе к поверхности, чем h_{min} , то о его наличии можно будет судить по уменьшению амплитуды регистрируемого ультразвукового импульса по сравнению с импульсом, прошедшим бездефектный участок. Чем ближе к поверхности локализован дефект, тем существеннее будет уменьшение амплитуды. Падение амплитуды результирующего сигнала связано с тем, что отраженный от дефекта импульс имеет фазу, противоположную по отношению к опорному импульсу. Разрешение по времени этих двух импульсов в этом случае невозможно, поскольку раз-

ность времен их прихода на приемник будет меньше длительности опорного импульса. Фактически регистрируемый сигнал будет представлять собой суперпозицию двух сигналов с противоположными фазами, в результате чего будет фиксироваться падение амплитуды по сравнению с импульсом, прошедшим через бездефектный участок.

Экспериментальные результаты

В качестве объекта с модельным подповерхностным дефектом был взят дюралюминиевый блок с вертикальным пропилом, внешний вид блока и размеры дефекта показаны на рис. 5(а). Стрелками показано направление распространения опорного импульса и импульса, отраженного от «вершины» пропила (цвета стрелок те же, что и на рис. 4). Поскольку глубина залегания вершины меньше, чем h_{\min} , регистрируемый сигнал при прохождении через дефектный участок практически отсутствует (рис. 5(б)).

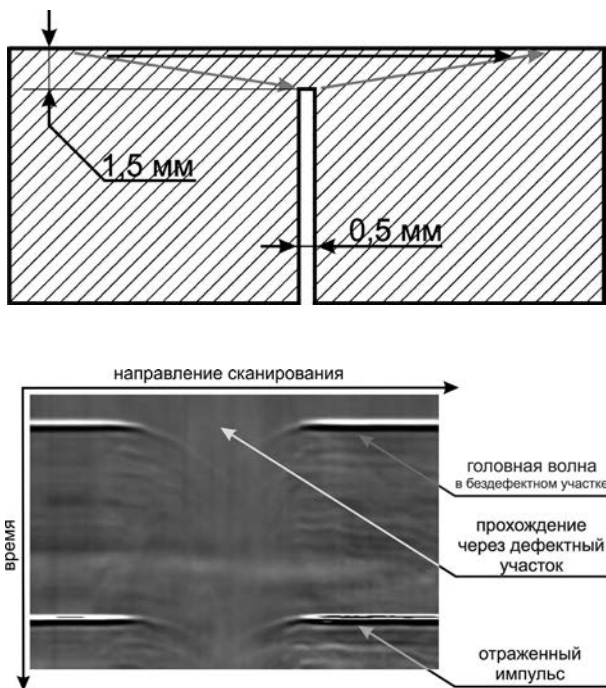


Рис. 5. Внешний вид дюралюминиевого блока с модельным подповерхностным дефектом (а), и сигналы головных акустических волн, прошедшие через дефектный и бездефектный участки блока (б)

Проведенные модельные эксперименты показали принципиальную возможность предложенной методики, основанной на зондировании объекта возбуждаемыми лазерным излучением головными акустическими волнами и их бесконтактной ЭМА-регистрации, для выявления подповерхностных дефектов типа вертикальных трещин субмиллиметрового размера.

Заключение

В настоящей работе проанализированы возможности создания нового метода бесконтактной лазерно-ультразвуковой дефектоскопии рельсов для выявления особо опасных дефектов, зарождающихся под поверхностью головки рельса. Широкий частотный диапазон и малая пространственная протяженность лазерно-возбуждаемых ультразвуковых зондирующих импульсов, а также их высокочувствительная бесконтактная регистрация с использованием ЭМАП позволят адаптировать разрабатываемую систему под задачу выявления усталостных вертикальных трещин малых (в пределе субмиллиметровых) размеров на ранних стадиях их развития и тем самым повысить уровень безопасности движения поездов. Решение данной задачи является приоритетным в рамках междисциплинарной темы «Обеспечение безопасности, в том числе кибербезопасности на железнодорожном транспорте в интересах ОАО «Российские железные дороги».

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта №13-02-13102 офи-м-РЖД «Анализ возможностей создания системы бесконтактной высокоскоростной лазерно-ультразвуковой дефектоскопии рельсов».

Литература

1. Каталог дефектов рельсов НТД/ЦП-2-2002. М.: Транспорт, 2002.
2. Гурвич А.К., Довнар Б.П., Козлов В.Б., Круг Г.А., Кузьмина Л.И., Матвеев А.Н. Неразрушающий контроль рельсов при их эксплуатации и ремонте. М.: Транспорт, 1983.
3. Марков А.А., Шпагин Д.А. Ультразвуковая дефектоскопия рельсов. 2 изд. С.-Пб.: Образование и культура, 2008.
4. Неразрушающий контроль: Справочник: (под общ. ред. Клюева В.В.). Том 3: Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. Ультразвуковой контроль. 2-е изд., испр. М.: Машиностроение, 2006.
5. ГОСТ 18576-96. Контроль неразрушающий. Рельсы железнодорожные. Методы ультразвуковые.
6. Марков А.А., Кузнецова Е.А. Дефектоскопия рельсов. Формирование и анализ сигналов. Книга 1. Основы. С.-Пб.: КультИнформПресс, 2010.
7. Clark R. Rail flaw detection: overview and needs for future developments // NDT&E Int., 2004, v.37, p.111-118.
8. Zumpano G., Meo M. A new damage detection technique based on wave propagation for rails // Int. J. Solid. Struct., 2006, v.43, p.1023-1046.
9. Fan Y., Dixon S., Edwards R.S., Jian X. Ultrasonic surface wave propagation and interaction with surface

- defects on rail track head // NDT&E Int., 2007, v.40, p.471-477.
10. Vary A. Material property characterization. In: Moore P.O., ed. Nondestructive testing handbook. Ultrasonic testing. Columbus: ASTM, 2007.
 11. Гусев В.Э., Карабутов А.А. Лазерная оптоакустика. М.: Наука, 1991.
 12. Басацкая Л.В., Ермолов И.Н. Теоретическое исследование ультразвуковых продольных подповерхностных волн в твердых телах // Дефектоскопия, 1980, №7, с.58-65.
 13. Юозонене Л.В. Упругие поверхностно-продольные волны и их применение для неразрушающего контроля // Дефектоскопия, 1980, №8, с.29-38.
 14. Карабутов А.А., Жаринов А.Н., Ивочкин А.Ю., Капительный А.Г., Карабутов А.А. (мл.), Ксенофонтов Д.М., Кудинов И.А., Симонова В.А., Мальцев В.Н. Лазерно-ультразвуковая диагностика продольных напряжений рельсовых плетей // Управление большими системами, 2012, №38, с.183-204.
 15. Dutton B., Boonsang S., Dewhurst R.J. A new magnetic configuration for a small in-plane electromagnetic acoustic transducer applied to laser-ultrasound measurements: modeling and validation // Sens. Actuators A: Phys., 2006, v.125, №2, p.249-259.
 16. Кожушко В.В., Палтауф Г., Кренн Х. Регистрация наносекундных оптико-акустических импульсов в стали // Акуст. журн., 2013, т.59, №2, с.279-282.

Капустин М.Ю., Космодамианский А.С., МГУПС (МИИТ), Москва

Применение адаптивных систем управления для автоматизации процесса прицельного торможения электропоезда

Специфика пригородного движения заключается в частых остановках у посадочных платформ, а также прибытие на тупиковые пути станций. Следовательно, прицельное торможение является часто повторяющейся процедурой, которую выполняет машинист. Возможности машиниста точно определять расстояния до цели и время его реакции значительно ограничены. При существующей тенденции увеличения скоростей движения перечисленные недостатки становятся более значимыми. Прибытие электропоезда на тупиковый путь станции является заключительным этапом поездной работы и накопленная за поездку усталость повышает вероятность ошибки машиниста при управлении тормозами. Несмотря на принятые организационные меры по ограничению скорости прибытия на тупиковые пути станций, имеют место случаи столкновения подвижного состава с тупиковой призмой. При этом время занятия маршрута при прибытии электропоезда на тупиковый путь увеличивается из-за установленных ограничений скоростного режима.

Учитывая сложившиеся обстоятельства, автоматизация процесса прицельного электропневматического торможения (ЭПТ) является актуальной задачей, решение которой позволит повысить безопасность движения поездов и улучшить эксплуатационные показатели. Поставленная задача может быть решена путем применения системы автоматического управления (САУ), относящейся к классу терминальных. Целью

управления такой САУ является обеспечение заданного конечного фазового состояния объекта управления $S = S_k; V = V_k$, что и требуется для автоматического управления прицельным торможением (рис. 1), а, следовательно, для обеспечения безопасности движения при подъезде к тупиковой призме. Кроме того, автоматический контроль скоростного режима позволит повысить среднюю допускаемую скорость прибытия электропоезда на тупиковый путь (рис. 2), что сократит время занятия маршрута приёма на станции.

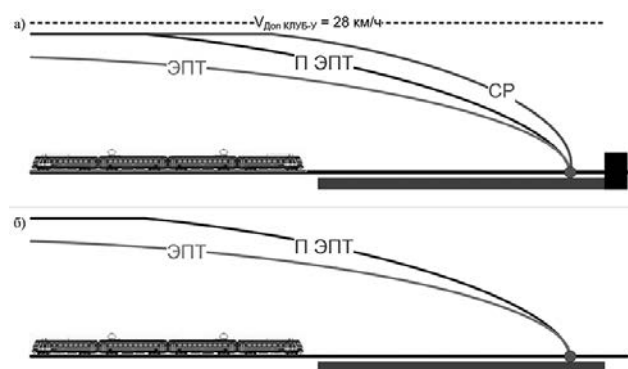


Рис. 1. Схема реализации автоматического управления прицельным электропневматическим торможением электропоезда: а) прибытие на тупиковый путь станции; б) остановка у посадочной платформы. СР – кривая принудительного экстренного торможения, реализуемое САУ через срывной клапан автостопа; П ЭПТ – принудительное служебное электропневматическое торможение реализуемое САУ; ЭПТ – электропневматическое торможение реализуемое машинистом.

Концепция построения САУ ЭПТ предусматривает, за счет автоматизации управления тормозными процессами в электропоезде, достижение основных целей:

- повышение уровня безопасности перевозочного процесса и его качества (комфорт пассажиров, сохранность подвижного состава и т.д.);
- сокращение времени прибытия поезда на станцию, особенно на тупиковых приемоотправочных путях;
- сокращение случаев неоправданного применения

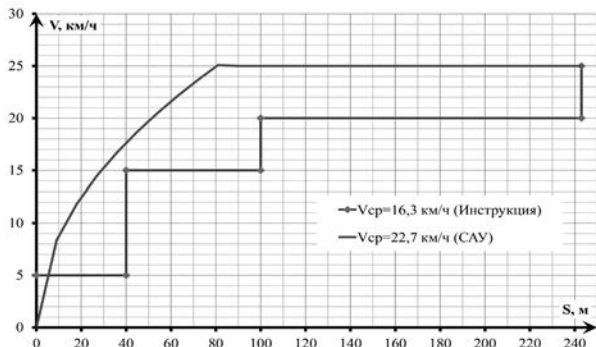


Рис. 2. Графические зависимости допускаемых скоростей от оставшегося расстояния до точки прицельной остановки перед тупиковой призмой

- САУ ЭПТ должна выполнять следующие функции, в том числе функции безопасности:
 - автоматическое позиционирование поезда, с допустимой погрешностью;
 - расчет программной скорости в функции расстояния до прицельной остановки, для служебного и экстренного торможений;
 - определение фактической скорости поезда;
 - контроль за непревышением фактической скорости над допускаемой.
- Требуемая точность остановки электропоезда должна соответствовать существующей разнице между длинами самого короткого приемоотправочного пути или пассажирской платформы на железнодорожной линии и самого длинного поезда, эксплуатируемого на этой линии, без учета длинооставных поездов.
- Должна быть обеспечена беспроводная передача достоверной информации с пути на ПС, с необходимой скоростью передачи для работы при максимальных скоростях движения.
- При нарушении машинистом скоростного режима приоритетным должно быть принудительное автоматическое служебное торможение меньшей ступени (с меньшим тормозным нажатием).
- В случае формирования различных управляющих команд на принудительное торможение более высоким приоритетом должна обладать управляющая команда с большим тормозным нажатием.

В соответствии с приведенными выше основными требованиями выбраны критерии качества управления прицельным электропневматическим торможением электропоезда.

Количественным критерием качества управления САУ является погрешность остановки поезда в прицельной точке, установлено ± 3 м.

Учитывая, что САУ ЭПТ может быть отнесена к локомотивным средствам обеспечения безопасности, необходимо принять следующие качественные критерии управления:

- Исключение случаев столкновения моторвагонного подвижного состава с тупиковой призмой, гарантируя его принудительную остановку непосредственно перед тупиковой призмой.
- Автоматическое управление ЭПТ должно выполняться, не допуская нарушений действующих инструкций.

Для обеспечения автоматизации управления прицельным торможением САУ должна периодически получать информацию о местоположении электропоезда относительно прицельной точки остановки, т.е. фазовую координату S. Поставленная задача решается организацией канала беспроводной передачи данных с пути на электропоезд, путем применения технологии радиочастотной идентификации (RFID). При этом RFID – метки (кодовые напольные датчики (КНД)) устанавливаются в определенных точках на пути, а считывающее устройство на головном вагоне электропоезда (рис. 3).

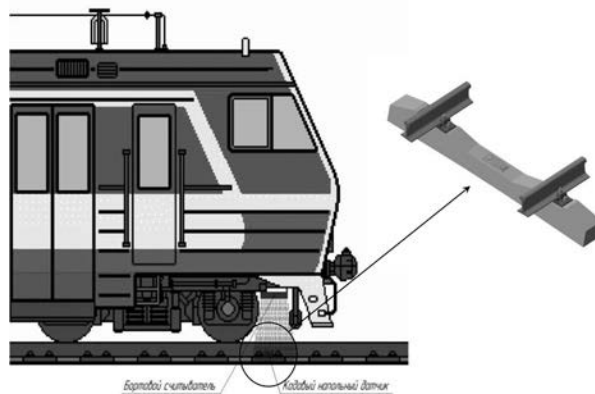


Рис. 3. Применение метода радиочастотной идентификации (RFID) для формирования фазовой координаты электропоезда

Качество канала передачи данных характеризуется вероятностью ошибки при приеме символа (бита) p (Bit Error Rate - BER) [1]. Опытным путем было установлено, что технология RFID обеспечивает $p \leq 10^{-3}$.

В КНД записывается его уникальный номер, рядность которого должна быть не менее 30 бит. В этом случае целесообразно выбрать БЧХ-код (63,50) с минимальным кодовым расстоянием не менее $d_{\min} = 6$, для

обеспечения требуемого уровня вероятности трансформации кода $P_{тр} \leq 10^{-10}$. При передаче данных манчестерским кодом количество считываний одного КНД увеличено до 18 раз, при скорости до 120 км/ч. Принятый критерий, что КНД корректного считывается, если принята хотя бы одна посылка, позволил снизить вероятность несчитывания КНД (подавления) до $P_{под} \approx 10^{-22}$, что дало возможность повысить вероятность правильного приема до $P_{пр} = 0,999\ 999\ 999\ 9$. Вероятность трансформации кода в общем случае $P_{тр} = 0,6 \cdot 10^{-10}$, что отвечает требованиям функциональной безопасности.

Натурный эксперимент по оценке погрешности позиционирования поезда при применении технологии RFID показал, что при скорости до 70 км/ч не исключены ошибки до 0,1 м. В качестве эталонного измерителя скорости была выбрана разработанная в ЗАО «ОЦВ» система высокоточного измерителя скорости и пройденного пути на основе СВЧ датчиков (ВИСП) [2]. СКО погрешности измерений ВИСП не превышает 0,2%.

В процессе торможения управляемая тормозная сила зависит от множества параметров (нажатие тормозных колодок, коэффициент трения колодки о колесо, масса поезда, время срабатывания воздухораспределителей и наполнения тормозных цилиндров и др.), большая часть которых недоступны для прямого измерения их величин. Кроме того на торможение влияет большое количество внутренних и внешних факторов (состояние тормозных средств поезда, погодные условия, взаимодействие колеса и рельса и др.). Задача автоматизации прицельного торможения усложняется тем, что характеристики объекта управления и условия его функционирования могут существенно изменяться. Таким образом, априорной информации об объекте управления (электропоезде) недостаточно для применения традиционных (неадаптивных) методов управления [3, 4]. Поэтому на начальной стадии торможения необходимо идентифицировать объект управления и выбрать закон управления. Эффект приспособления к условиям функционирования в адаптивных системах управления обеспечивается накоплением и обработкой информации о поведении объекта управления в процессе его функционирования [3].

Структура объекта известна и неизменна, только его поведение зависит от ряда неизвестных параметров. В этом случае применяют самонастраивающиеся беспоисковые системы.

При автоматическом управлении ЭПТ необходимо на первой ступени торможения произвести идентификацию объекта управления, затем определить соответствующие коэффициенты регулятора. Такую функцию выполняют адаптивные системы с настраиваемой моделью.

Учитывая важное преимущество адаптивных САУ, не требующих полной априорной информации об объ-

екте управления и условиях его функционирования, можно сделать вывод, что такие САУ наиболее подходят для решения задачи автоматизации процесса прицельного торможения электропоезда.

При автоматизации процесса прицельного торможения необходимо учесть множество факторов, как было отмечено выше, большинство из которых не представляется возможным определить и измерить. Возникает задача, заключающаяся в выборе одного параметра, который бы наиболее полно характеризовал тормозные средства электропоезда и поддавался бы определению в процессе управления тормозным процессом. Таким параметром выбран действительный тормозной коэффициент ϑ_D и при адаптивном управлении тормозами электропоезда процессом адаптации является установление явной зависимости действительного тормозного коэффициента от давления в тормозном цилиндре $\vartheta_D(p_{TC})$ [5].

Математическая модель объекта управления – электропоезда, учитывающая наличие двух типов вагонов МВПС имеет вид:

$$\hat{\vartheta}_D = \frac{A_1 p_{TC}^3 + B_1 p_{TC}^2 + C_1 p_{TC} + D_1}{B'_1 p_{TC}^2 + C'_1 p_{TC} + D'_1}, \quad (1)$$

где $A_1, B_1, C_1, D_1, B'_1, C'_1, D'_1$ – коэффициенты, учитывающие параметры тормозных средств электропоезда; p_{TC} – давление в тормозном цилиндре.

Разделив числитель и знаменатель на D'_1 выражение (1) примет вид:

$$\hat{\vartheta}_D = \frac{A_2 p_{TC}^3 + B_2 p_{TC}^2 + C_2 p_{TC} + D_2 - B'_2 p_{TC}^2 \hat{\vartheta}_D - C'_2 p_{TC} \hat{\vartheta}_D}{D_2}, \quad (2)$$

Для установления явной зависимости $\vartheta_D(p_{TC})$ необходимо решить обратную задачу, при этом зашумленность сигнала и погрешность квантования переводит её в область некорректных.

При каждом изменении p_{TC} определяется изменение фактической скорости ΔV и пройденного пути ΔS за заданный промежуток времени. По этим данным производится оценка $\hat{\vartheta}_D$, порядок которой будет приведён ниже. Подставляя в (2) определенные значения $(p_{TCk}, \vartheta_{Dk})$, получим систему линейных уравнений, записанную в матричном виде:

$$\begin{pmatrix} \vartheta_{D1} \\ \vartheta_{D2} \\ \vdots \\ \vartheta_{Dn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_{TC1}^3 & p_{TC1}^2 & p_{TC1} & 1 & -p_{TC1}^2 \vartheta_{D1} & -p_{TC1} \vartheta_{D1} \\ p_{TC2}^3 & p_{TC2}^2 & p_{TC2} & 1 & -p_{TC2}^2 \vartheta_{D2} & -p_{TC2} \vartheta_{D2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{TCn}^3 & p_{TCn}^2 & p_{TCn} & 1 & -p_{TCn}^2 \vartheta_{Dn} & -p_{TCn} \vartheta_{Dn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{pmatrix} \quad (3)$$

Система (3) может быть записана в виде:

$$\bar{\vartheta}_D = F \cdot \bar{X}, \quad (3a)$$

где F – матрица экспериментальных данных; \bar{X} – вектор параметров, подлежащих оценке $(A_2, B_2, C_2, D_2, B'_2, C'_2)$.

Система уравнений переопределена и для ее решения методом регуляризации Тихонова необходимо найти такой вектор \bar{X} , чтобы выполнялись два условия: условие минимизации невязки и условие минимизации нормы решения. Задача решения системы линейных уравнений (3) заменяется задачей отыскания условного минимума функции, которая решается методом неопределенных множителей Лагранжа:

$$\|F \cdot \bar{X} - \bar{\vartheta}_D\|_{L_2}^2 + \alpha \|\bar{X}\|_{L_2}^2 = \min_{\bar{X}} \quad (4)$$

где α – малый положительный параметр регуляризации. $\alpha=10^{-4} \div 10^{-3}$ определен способом подбора, на основе расшифровок регистрации поездов при управлении тормозами электропоезда машинистами.

Из условия выше вытекает уравнение Тихонова:

$$F^T \bar{\vartheta}_D = (F^T F + \alpha E) \hat{X}, \quad (5)$$

где E – единичная матрица; \hat{X} – нормальное псевдорешение.

Регуляризованное решение уравнения дает оценку:

$$\hat{X} = (F^T F + \alpha E)^{-1} F^T \bar{\vartheta}_D, \quad (6)$$

Получив оценку \hat{X} , находим явную зависимость $\vartheta_D(p_{TC})$, на основании которой выполняется расчет прицельного торможения.

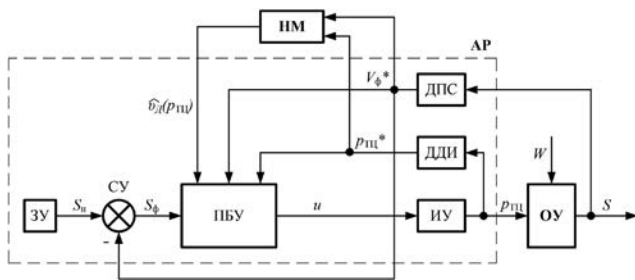


Рис. 4. Функциональная схема адаптивной системы автоматического управления прицельным электропневматическим торможением электропоезда (САУЭПТ)

Разработанная функциональная схема САУЭПТ, которая является самонастраивающейся, беспойсковой САУ с настраиваемой моделью представлена на рис. 4. Задающее устройство (ЗУ) независимо от машиниста формирует и передает в суммирующее устройство (СУ) начальную фазовую координату S_n . СУ формирует текущую фазовую координату S_f , определяющую расстояние до прицельной точки остановки. Настраиваемая модель (ИМ) на основе значений давления в ТЦ p_{TC}^* и фактической скорости $V_{ф}^*$, измеренных датчиком давления (ДДИ), датчиком пути и скорости (ДПС), формирует оценку действительного

тормозного коэффициента $\vartheta_D(p_{TC})$. Программный блок управления (ПБУ), получив зависимость $\vartheta_D(p_{TC})$, а также S_f , $V_{ф}^*$ и p_{TC}^* , формирует управляющее воздействие u , передаваемое системой на исполнительное устройство (ИУ), которое изменяет управляющее воздействие p_{TC} на объект управления (ОУ) – поезд [6].

Выводы

Задача автоматизации прицельного торможения является актуальной, так как её решение позволит повысить безопасность движения поездов на тупиковых приёмootправочных путях станций, сократить время прибытия электропоезда на тупиковый путь.

Для автоматизации процесса прицельного торможения электропоезда целесообразно применять адаптивные САУ. Идентификацию объекта управления – электропоезда необходимо производить на начальной стадии торможения, устанавливая явную зависимость $\vartheta_D(p_{TC})$.

Для определения фазовой координаты электропоезда целесообразно применять технологию RFID.

Литература

1. Martin Werner «Information und Codierung: Grundlagen und Anwendungen» Auflage 2, vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage Mit 162 Abbildungen und 72 Tabellen., Vi.weg+T.bner 2008.
2. Дёжин Ю.И., Абрамов В.М., Васин Н.К., Малахов С.В., Никифоров Б.Д., Рабинович М.Д., Соколов А.Н. Локомотивная система определения скорости движения и пройденного пути. РОСПАТЕНТ RU 2378654 С1 10.01.2010 г.
3. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 5-ти тт.; 2-е изд., перераб. и доп. Т.5: Методы современной теории автоматического управления / Под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 784 с.; ил.
4. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т.2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы: Учеб. Пособие. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 464 с.
5. Капустин М.Ю. Краснолобов С.И. Саркисян П.С. Модель адаптивной системы прицельного электропневматического торможения электропоезда // Наука и техника транспорта, № 4, 2011 г. – с. 33-43.
6. Космодамианский А.С., Капустин М.Ю. Адаптивная система управления прицельным электропневматическим торможением поезда. // Наука и техника транспорта, № 3, 2011 г. – с. 65-68.

Розенберг И.Н., Дулин С.К., ОАО «НИИАС», Москва

Семантическая геоинтероперабельность – основа интеллектуализации корпоративного доступа к геоданным

Введение

Возможность совместного использования геоданных (геоинтероперабельность) было одним из основных требований, начиная с разработки первой ГИС. Несмотря на то, что прошлые два десятилетия были очень продуктивными с точки зрения развития геоинтероперабельности, она пока еще не стала общезначимой. Хотя стандарты, разработанные ISO/TC 211 и Open Geospatial Consortium (OGC) Inc. обеспечили основу для ее развития, и во многих организациях (Canadian Geospatial Data Infrastructure (CGDI), National Spatial Data Infrastructure (NSDI), Infrastructure for Spatial Information in Europe (INSPIRE), Global Spatial Data Infrastructure (GSDI) возникли пространственные инфраструктуры данных, геоинтероперабельность все же находится в стадии становления.

С другой стороны, за эти два десятилетия произошло внушительное развитие Интернета и Web. В настоящее время Web совершенствуется до Semantic Web (или Web 3.0), эволюционируя от Web документов до Web данных, превращаясь в международную открытую базу данных. Все это внушает определенный оптимизм в отношении реализации геоинтероперабельности.

1. Понятие интероперабельности

Существительное «интероперабельность» означает способность одной системы использовать части другой системы (Словарь Merriam-Вебстера, <http://www.m-w.com>) без специального усилия со стороны клиента; то есть она превышает возможности коммуникации (<http://www.dictionary.com>). С позиции информатики основная суть определения – это способность использовать информацию, полученную в результате обмена. Международная организация по стандартизации ISO 19119 предлагает такое определение (http://www.wmo.int/pages/prog/www/TEM/ET-WISC-I/ISO_191xx.doc): «Интероперабельность представляет собой способность соединяться, выполнять программы или передавать данные среди различных функциональных модулей способом, который не требует, чтобы пользователь имел знания о характеристиках этих модулей».

В соответствии с этим определением два компонента А и В (рис. 1) могут взаимодействовать (являются интероперабельными), если А может послать основанные на взаимном понимании А и В запросы Q для ис-

пользования сервисов, находящихся у В, и если В может подобным образом вернуть взаимно понятные ответы R к А.

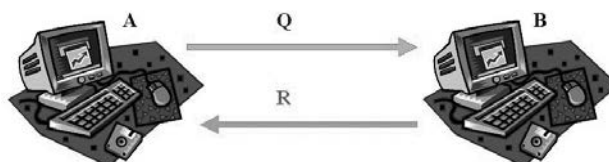


Рис. 1. Интероперабельность

Это означает, что две интероперабельные системы могут взаимодействовать совместно для выполнения задачи.

Для географической области применимо следующее описание термина «географическая интероперабельность» (http://www.wmo.int/pages/prog/www/TEM/ET-WISC-I/ISO_191xx.doc): «Географическая интероперабельность – это способность информационных систем к:

- 1) свободному обмену всех видов пространственной информации о Земле и об объектах и явлениях, выше и ниже поверхности Земли;
- 2) совместному сетевому использованию программного обеспечения, предназначенному для управления такой информацией».

Следует отметить, что это определение не предполагает, что каждый компонент использует один и тот же формат данных (совпадение форматов соответствует обычно неправильному восприятию многими людьми интероперабельности), а скорее провозглашает способность понимать форматы друг друга.

На техническом уровне интероперабельность включает коммуникацию, определенную соответствующим протоколом коммуникации, аппаратными средствами, программным обеспечением и уровнями совместимости данных. Такая интероперабельность соответствует обеспечению синтаксической интероперабельности в смысле передачи параметров, а семантическая интероперабельность имеет дело со знаниями проблемной области, необходимыми для информационных сервисов, чтобы «понять» мотивации и креативы друг друга.

Сущность интероперабельности – в реализации отношений между системами, где каждое отношение – способ коммуникации, обмена, кооперации и совместного использования ресурсов [1]. Современная ГИС может быть составлена из нескольких компонентов

аппаратных средств, программного обеспечения, ресурсов, правил управления, процедур и людей, которые хранят, обрабатывают и обеспечивают доступ к географической информации. Эти компоненты традиционно предоставляют пользователям гомогенный подход, основанный на обработке отдельного продукта ГИС и использовании технологии системы как фактического стандарта. В противоположность этому ГИС, обладающая интероперабельностью, обрабатывает среды, в которых разнообразие одних и тех же компонентов сосуществует и взаимодействует.

В контексте географической информации (ГИ) интероперабельность непосредственно связана с ГИС. ГИС представляет собой основную среду для реализации геоинтероперабельности, потому что в ней в центре внимания пространственные данные, которые более сложны, чем обычные текстовые данные, сохраненные в реляционных базах данных. Характеристики географической информации не предусмотрены для отображения реляционной моделью, а объектная модель является слишком общей для независимого выполнения операций любого вида, что препятствует интероперабельности. Проблемы интероперабельности ГИ выглядят еще более серьезными, если добавить к присущей ГИ сложности геоданных институциональные и юридические осложнения [1]. Этим, по-видимому, и объясняется существование довольно большого количества необходимых стандартов.

2. Уровни интероперабельности

Исследования последних лет в области интероперабельности указывают на необходимость создания моделей интероперабельности, которые могут гарантировать, что интероперабельность устанавливается между системами в соответствии с различными целями и контекстами [2].

Существует несколько подходов к формированию ГИС посредством моделей интероперабельности [3]. Каждый подход имеет преимущества и недостатки относительно достижения интероперабельности в определенном контексте. Основные преимущества моделей интероперабельности – это возможность (а) определения общего словаря, который обеспечивает единообразие семантики и возможность анализа; (б) альтернативы предложений относительно структуры решений и, наконец, (с) оценки новых идей и добавления различных опций.

Примерами моделей интероперабельности, которые были успешно применены вне специфики ГИС области, являются C4ISR Architectures Working Group's Levels of IT Systems Interoperability (LISI) model (LISI 1998), the Enterprise Interoperability Maturity Model (EIMM) (Athena 2005), the Organisational Interoperability Maturity Model (OIMM) (Clark and

Jones 1999) и the Organisational Interoperability Agility Model (OIAM) (Kingston et al. 2005). Две модели – the Levels of Conceptual Interoperability Model (LCIM) и the Intermodel5 использовались в ГИС области. Все эти модели в основном используются на самых высоких уровнях организационной интероперабельности из традиционных семи уровней: уровень нулевой интероперабельности, технический, синтаксический, семантический, прагматический, динамический и концептуальный уровни (рис. 2) [3].

Технический уровень интероперабельности обычно связывается с взаимосвязью, представлением и обменом данными, доступностью и характеристиками безопасности типа протоколов, интерфейсов, форматов документа, кодирования данных, а также как мер доступности и решений безопасности. Здесь рассматривают технические аспекты интероперабельности распределенной вычислительной среды, сетей коммуникации, непосредственно технологий и распределенных платформ вычисления. Техническая интероперабельность в основном позиционируется как связь между компьютерными системами и сервисами.



Рис. 2. Уровни интероперабельности

Синтаксический уровень интероперабельности обеспечивает общую структуру обмена информацией, в которой применяется установленный формат данных. В контексте ГИС синтаксическая интероперабельность определяется как спецификация общих форматов сообщения для обмена пространственными данными, образцами и связями.

Семантическая интероперабельность связана со значением совместно обрабатываемой информации, или другими словами, со смыслом данных, воспринимаемым другими людьми. Различия в информационном контексте происходят обычно из-за различных значений одного и того же реального объекта, который сохранен в различных базах данных [4].

К прагматическому уровню относятся намерения, обязанности и последствия сформулированных утверждений. Этот уровень может быть достигнут, когда

взаимодействующие системы осведомлены об используемых методах и процедурах. Основная исследовательская проблема здесь связана с тем, как обеспечить механизмы прагматического уровня интероперабельности в Сервисной Ориентированной Архитектуре (SOA) [5].

Динамический тип интероперабельности имеет место, когда системы в состоянии воспринимать изменения состояния, которые происходят с предположениями и ограничениями, сделанными в течение долгого времени, и в состоянии использовать эти изменения в своих интересах. Динамическая интероперабельность может быть рассмотрена в этом случае в двух аспектах: динамическая интероперабельность данных и динамическая сетевая интероперабельность.

Установлено, что концептуальный тип интероперабельности может быть достигнут, когда концептуальная модель зарегистрирована техническими методами так, чтобы она могла интерпретироваться и оцениваться третьим лицом. В том случае, если концептуальные модели (то есть предположения и ограничения значимой абстракции действительности) зафиксированы, то достигнут самый высокий уровень интероперабельности.

3. Онтологии

Онтология в информатике согласно современным толкованиям является «явным спецификацией концептуализации предметной области» [6], но с определенными ограничениями в зависимости от области интересов, и должна включать словарь терминов и некоторые спецификации их значений. Использование онтологий способствует созданию адекватных концептуальных моделей, обеспечивая качественное, контролируемое информационное интегрирование.

Несмотря на большой накопленный опыт сбора, обработки и анализа данных и широкое применение изображений поверхности Земли, онтологический статус таких изображений остается открытой проблемой. Удивительно, но не всегда просто ответить на элементарный вопрос: «Что находится на изображении земной поверхности?» или перефразировать тот же самый вопрос по-другому, «Что является онтологическим статусом информационного содержания изображений, полученных в результате дистанционного сканирования или фотосъемки поверхности Земли?»

Для ответа на этот вопрос необходимо решить как минимум две проблемы: 1) разработать концептуальное основание для всех типов компьютерных представлений географического пространства, включая изображения, векторные данные, информацию о расположении и цифровые модели ландшафта; 2) разработать технологию ГИС, которая могла бы объединить изображения без разрывов в пространственную базу

данных на основе понимания онтологического статуса изображений, полученных в результате дистанционного сканирования. Такая интеграция особенно актуальна в контексте нового поколения пространственных информационных систем, которые, как ожидается, обеспечат представление и использование онтологий.

Наиболее широко принятая концептуальная модель данных для пространственной информации предполагает, что географическая действительность представлена или как полностью определяемые сущности (объекты), или как непрерывное пространственное изменение (область, поле). Модель объекта представляет мир как поверхность, занятую дискретными объектами с геометрическим представлением и описательными признаками. Модель на основе парадигмы поля представляет географическую действительность как ряд пространственных распределений в географическом пространстве [7].

Дихотомия объекта с непрерывными характеристиками – характерное географическое понятие, не предназначенное, тем не менее, обеспечивать поддержку специфики семантики различных типов пространственных данных. Этот недостаток заставил многих исследователей перенести акцент на использование онтологий как средства диссеминации знаний в группах пользователей с различными интересами, тем самым улучшая функциональную совместимость с различными базами геоданных. При этом диссеминация знаний напрямую зависит от успешности трансформации неявных знаний в явные. Формализация неявных знаний представляет большую сложность, поскольку они во многих случаях носят личностный характер, контекстно зависимы и трудно выявляемы.

На рис. 3 приведена классическая схема преобразования неявных знаний в явные, состоящая из четырех основных этапов: обобществления, формализации, диссеминации и усвоения [8]. Под обобществлением понимается обобщенный процесс выработки неявных знаний. Формализация предполагает изложение своих знаний в той или иной явной, наглядной или читаемой форме. Для того, чтобы ознакомить с результатами своего труда других специалистов, необходимо преобразовать знания из одной формы представления в другую и распространить их по доступным каналам связи. Этот процесс назван диссеминацией. На четвертом этапе происходит изучение полученного знания, его осознание и усвоение.

Онтология играет существенную роль в создании ГИС, так как она позволяет устанавливать соответствия и взаимосвязи среди различных типов геоданных – пространственных сущностей и отношений. Использование онтологий будет способствовать улучшению функционирования информационных систем,

благодаря тому, что удастся избежать проблем, вызванных противоречиями между онтологиями, неявно внедренными в ГИС, конфликтами между онтологическими концепциями и реализацией, а также конфликтами между онтологиями «здравого смысла» пользователя и математическими концепциями программного обеспечения.

Существующие концептуальные схемы могут использоваться, чтобы создать приблизительные онтологии, в то время как существующие онтологии могут использоваться, чтобы генерировать концептуальные схемы с помощью или без помощи опытного разработчика модели (рис. 4) [9].

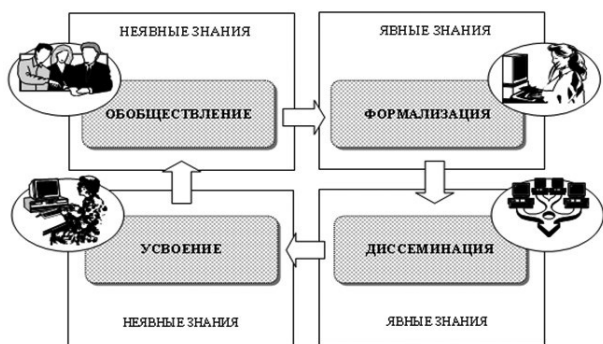


Рис. 3. Преобразование знаний

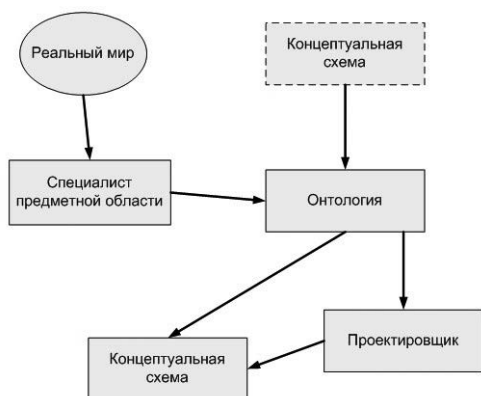


Рис. 4. Взаимосвязь онтологии и концептуальной схемы

Имеются три различных уровня абстракций, на которых находятся как онтологии, так и концептуальные схемы [9].

Первый уровень – формальный, на котором в конструкции онтологий и концептуальных схем включены абстрактные концепции.

Когда мы сопоставляем содержание формального уровня с географическими приложениями, мы получаем второй уровень абстракции, или уровень типов геоданных.

На прикладном уровне онтологии более конкретны, являясь уточнением специализаций уровня типов геоданных, и формируются в соответствии с концеп-

циями поля знания, заданного приложением. Исследование онтологического статуса пространственных типов данных – наиболее актуальное направление в геоинформатике.

4. Семантическая геоинтероперабельность

Геоинтероперабельность можно представить как двунаправленный механизм в противоположность конвейеру, обрабатывающему информацию только в одном направлении - от источника к адресату. Установление семантической геоинтероперабельности выходит за пределы простой возможности получить доступ к информации географических баз данных на дисплее или напечатанной на бумаге. Оно требует больше времени, заранее должен быть известен точный словарь географических баз данных, чтобы получить соответствующую информацию. Но самое существенное, что установление семантической геоинтероперабельности предполагает, что пользователи и провайдеры должны иметь релевантное понимание семантики запросов и ответов. В контексте Semantic Web такая возможность становится все более и более доступной.

Моделирование семантики глубоко внедрено в структуру геоинтероперабельности и, таким образом, обеспечивает исчерпывающее описание семантической геоинтероперабельности в целом, которая лежит в основе развития семантической пространственной инфраструктуры данных и Semantic Web геопространственной информации.

В 2001 была выдвинута идея Semantic Web [10]. В ее основе лежало предложение модернизировать Web от уровня документов до уровня данных и информационного моделирования. В Semantic Web данные должны быть понятными и обрабатываемыми, и поэтому Semantic Web должна быть способной к ответу на вопросы в отличие от простой передачи документов или Web-страниц, соответствующих определенным критериям ключевого слова.

Идея создания геопространственной Semantic Web впервые была представлена в 2002 году [11]. Она должна расширить понятие Semantic Web, улучшив семантическую функциональную совместимость географической информации в Web [12].

За это время усилия по стандартизации ISO/TC 211 и OGC и развитие геоинформатики обеспечили в большой степени основу для создания геопространственной Semantic Web. Международные стандарты ISO/TC 211 определили онтологию геопространственных понятий, которые являются независимыми от приложений. Эта онтология – основа описания географической информации, которая включает понятия для описания геометрии, топологии, временной информации, пространственных систем справочной информации,

особенностей, характеристик, поведений, отношений, качества, метаданных и сервисов (позиционирование, изображение, местоположение и т.д.).

Заключение

Геопространственная Semantic Web обеспечит важные дополнительные возможности для семантической геоинтероперабельности, делая географическую информацию доступной более широкому кругу пользователей. Пользователи различных дисциплин получат больше возможности объединить ГИ в пределах их определенного приложения. Геопространственная Semantic Web не только расширяет функциональную совместимость ГИ, но также обеспечивает функциональную совместимость информации всех источников данных Web.

Литература

1. Assche, F. (2006). An interoperability framework. (Learning interoperability framework for Europe). [online]. Retrieved on 1 October 2008 from: <http://www.intermedia.uio.no/display/life/>
2. Kingston, G., Fewell, S., and Richer, W. (2005). An organisational interoperability agility model. [online]. Retrieved on 1 October 2008 from: <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA463924&Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf>
3. Turnitsa, C., and Tolk, A. (2006). Battle management language: a triangle with five sides. Proceedings of the Simulation Interoperability Standards Organization (SISO) Spring Simulation Interoperability Workshop (SIW), Huntsville, AL, 2–7 April 2006.
4. Probst, F. Ontological analysis of observations and measurements. Proceedings of the Fourth International Conference on Geographic Information Science, GIScience 2006, Münster, Germany, 20–23 September 2006 Lecture Notes in Computer Science 4197. Berlin: Springer Verlag, pp. 304–320.
5. ESRI (2007). Geospatial service-oriented architecture (SOA). White Paper. Redlands, CA: ESRI. Retrieved on 1 October 2008 from: <http://www.esri.com/library/whitepapers/pdfs/geospatial-soa.pdf>
6. Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф. Базы знаний интеллектуальных систем // СПб: Питер 2000.
7. Burrough, P. and A. Frank, eds. Geographic Objects with Indeterminate Boundaries. Taylor & Francis: London. 1996.
8. Ikujiro Nonaka & Hirotaka Takeuchi. The Knowledge Creating Company: How Japanese Companies Create the Dynamics of Innovation. Oxford University Press, 1995 (<http://users.ccnet.com/~tom1359/books.htm#knowledge>).
9. Дулин С.К., Поповидченко В.Г. Структура представления онтологии геоданных. – М.: ВЦ РАН, 2007. 23 с.
10. T. Berners-Lee, J. Hendler, O. Lassila: The Semantic Web, Sci. Am. May, 34–43 (2001).
11. T. Berners-Lee: Artificial intelligence and the Semantic Web, Proc. Conf. Artif. Intell. AAAI-06 (2006).
12. Щукин В.А. Семантические Web-сервисы // Информационно-измерительные и управляющие системы, № 6, т. 11, 2013. – С. 60–64.

Михайлов С.В., ОАО «ВНИИЖТ», Москва

Определение оптимальной скорости проведения испытаний по воздействию подвижного состава на путь

Введение

Одним из актуальных направлений математического моделирования является повышение эффективности процессов испытаний, выраженное в виде сокращения сроков и стоимости их проведения.

В целях сокращения затрат ставится задача выбора оптимальных скоростей при проведении испытаний.

В данной работе проведено исследование одного показателя воздействия железнодорожного подвижного состава на железнодорожный путь - отношения рамных сил к вертикальной статической нагрузке колесной пары на рельсы.

Постановка задачи

Согласно ГОСТ Р 55050-2012 [1] рамные силы определяют экспериментально с применением датчи-

ков относительных линейных перемещений в поперечных горизонтальных (боковых) связях рамы тележки с колесной парой (колесным блоком), при известных величинах жесткости упругой связи рамы тележки с колесной парой в горизонтальном поперечном, относительно оси пути, направлении.

Нормы допустимого воздействия железнодорожного подвижного состава на железнодорожный путь: допускаемое отношение рамной силы к вертикальной статической нагрузке колесной пары на рельсы $P_{ст}$ при движении в прямых, кривых участках железнодорожного пути и стрелочных переводах:

- Для железнодорожного пути с типовой конструкцией верхнего строения пути 0,4.

- Для железнодорожного пути с песчаным и гравийным балластом 0,3.

Замеры производятся при помощи датчиков на 1-й, 2-й и 4-й колесных парах.

При помощи методов математического моделирования требуется установить, при каких скоростях вероятность отклонения исследуемой характеристики от установленных согласно ГОСТ Р 55050-2012 норм максимальна.

Решение

В исходных данных содержатся результаты измерений рамных сил на колесных парах в прямом участке пути при скоростях 80, 100, 120, 132 км/ч, определенные в ходе натурных испытаний.

На основании экспертных оценок предполагаем, что распределение нормальное. Воспользуемся критерием χ^2 (хи-квадрат). Составим статистику критерия [2, 3]:

$$\chi_p^2 = \sum_{i=1}^m \frac{(n_i - nP_i(\theta))^2}{nP_i(\theta)},$$

где m – число интервалов разбиения, n – общее количество элементов в выборке, n_i – число выборочных значений, попавших в i -й интервал, $P_i(\theta)$ – теоретическая вероятность попадания значения в i -й интервал согласно выбранному закону распределения с параметрами θ .

$k=m-r-1$ – число степеней свободы, где r – число оцененных по выборке параметров (здесь $r=2, m=14$).

Статистические оценки исходных данных указаны в таблице.

Колесная пара	Скорость v	Значение статистики χ^2 ($k=11$)	Математическое ожидание	Дисперсия
1	80	4,192	0,963	0,213
	100	10,118	0,101	0,269
	120	9,421	0,705	0,328
	132	8,152	0,627	0,349
2	80	5,250	0,227	0,283
	100	5,311	1,580	0,413
	120	15,409	1,855	0,565
	132	14,803	1,679	0,623
4	80	11,875	0,027	0,232
	100	7,312	0,817	0,345
	120	9,228	1,001	0,404
	132	10,084	1,075	0,417

Отметим, что для всех колесных пар при всех скоростях значение статистики не превосходит критического табличного значения $\chi_p^2 < \chi_{табл}^2$ на уровне значимости $\alpha=0,05$.

Таким образом, гипотеза о нормальности распределения не расходится с результатами экспериментов.

Положим параметры распределения как функции от скорости $\mu=\mu(v), \sigma=\sigma(v)$. Отметим, что с ростом скорости дисперсия увеличивается, а следовательно $\sigma(v) \rightarrow \max \Leftrightarrow v \rightarrow \max$.

Найдем, при какой скорости вероятность достижения критического значения отношения рамных сил к вертикальной статической нагрузке колесной пары на рельсы максимальна:

$$\int_{0.4P_{cm}}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma(v)} e^{-\frac{(x-\mu(v))^2}{2\sigma^2(v)}} dx \rightarrow \max \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \frac{1}{2} \left(\operatorname{erf} \left(\frac{\mu(v) - 0.4P_{cm}}{\sqrt{2}\sigma(v)} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{\mu(v) - \infty}{\sqrt{2}\sigma(v)} \right) \right) \rightarrow \max \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left(\frac{\mu(v) - 0.4P_{cm}}{\sqrt{2}\sigma(v)} \right) \rightarrow \max \Leftrightarrow \frac{\mu(v) - 0.4P_{cm}}{\sqrt{2}\sigma(v)} \rightarrow$$

$$\rightarrow \max \Leftrightarrow \frac{-0.4P_{cm}}{\sqrt{2}\sigma(v)} \rightarrow \max \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \sigma(v) \rightarrow \max \Leftrightarrow v \rightarrow \max,$$

где

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n x^{2n+1}}{n!(2n+1)}$$

является возрастающей функцией на всей области определения.

Таким образом, установлено, что наибольшая вероятность достигается при максимальном значении дисперсии, которое, в свою очередь, растет при увеличении скорости. Следовательно, с точки зрения статистической оценки экспериментальных данных, испытания с целью определения соответствия отношения рамных сил к вертикальной статической нагрузке стандарту, следует проводить при максимальной скорости, в данном случае – 132 км/ч.

Заключение

В результате работы была установлена критическая скорость, при которой вероятность выхода значения исследуемой характеристики за рамки допустимого максимальна. На основании этого предложены рациональные значения скорости с точки зрения оценки отношения рамных сил к вертикальной статической нагрузке колесной пары на рельсы. Полученный результат совпадает с экспертной оценкой и реальными наблюдаемыми процессами.

Литература

1. ГОСТ Р 55050-2012. Железнодорожный подвижной состав. Нормы допустимого воздействия на железнодорожный путь и методы испытаний. Москва, Стандартиформ, 2013, 20 с.
2. Исследование операций. Вентцель Е.С., Москва, «Советское радио», 1972, 552 с.
3. Прикладная статистика: Основы моделирования и первичная обработка данных. Справочное изд., С.А. Айвазян, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин. — М.: Финансы и статистика, 1983, 471 с.

Савостин А.А., Алейников А.А., Михайлов С.И., ИТЦ «СКАНЭКС», Москва
Васильский А.С., ОАО «НИИАС», Москва

Методика тематической обработки данных спутниковой съемки при мониторинге экзогенных воздействий на железнодорожную инфраструктуру

Данные дистанционного зондирования Земли (ДДЗ) давно и успешно используются для осуществления мониторинга состояния наземных объектов в самых разных областях человеческой деятельности – в области лесного хозяйства, сельского хозяйства, при анализе состояния водных объектов, для прогноза, наблюдения за ходом и оценки последствий чрезвычайных ситуаций, для контроля землепользования, мониторинга строительства и во многих других сферах. Спутниковый снимок является сложным технологическим продуктом, технические характеристики которого определяют возможность его использования для решения тех или иных задач. Кроме этого, спутниковый снимок является документом, дающим возможность не только получения объективной и достоверной информации по исследуемому объекту, но и возможность верификации этой информации с привлечением дополнительных данных и независимых экспертов. Современные методы технологической и тематической обработки ДДЗ дают возможность существенно сократить время обработки данных и повысить достоверность получаемого результата.

Методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) обладают уникальным сочетанием преимуществ перед традиционными наземными методами. Естественно, использование ДДЗ не может полностью заменить наземные геодезические, геологические изыскания и другие работы. Однако сочетание методов дистанционного зондирования с результатами наземных обследований позволяет не только выйти на качественно новый уровень получения данных и обработки информации, но также весьма существенно оптимизировать процессы планирования работ и принятия управленческих решений, существенно сократить объемы наземных обследований, что, в конечном итоге, приводит к достаточно существенной финансовой экономии и сокращению сроков выполнения работ. Этим обусловлено активное использование методов спутникового дистанционного зондирования при мониторинге распределенных геотехнических систем, подверженных различным экзогенным воздействиям, в частности, территорий городской застройки, протяженных инфраструктурных объектов топливно-энергетического и транспортного комплекса [2, 5].

Работы по внедрению методов спутникового дистанционного зондирования в составе комплексных систем геотехнического мониторинга объектов железнодорожной инфраструктуры проводятся ОАО «РЖД» [4]. В 2010 году на участке Туапсе – Адлер Северо-Кавказской железной дороги введена в эксплуатацию разработанная ОАО «НИИАС» совместно с рядом российских и зарубежных компаний технология мониторинга потенциально опасных природных и техногенных воздействий на объекты железнодорожной инфраструктуры с использованием данных спутниковой съемки [3]. Технология основана на использовании материалов спутниковой съемки высокого пространственного разрешения в видимой и ближней инфракрасной (БИК) зонах спектра, а также результатов дифференциальной интерферометрической обработки данных радиолокационной спутниковой съемки. Использование методов ДЗЗ позволяет осуществлять контроль ситуации в полосе отвода и охранных зонах, а также на прилегающих, в том числе труднодоступных, территориях. При этом обеспечивается периодический контроль экзогенных процессов и оценка состояния инфраструктурных объектов, прогноз развития неблагоприятных процессов и назначение мероприятий по предотвращению разрушительных воздействий.

Первоначально использовавшиеся методы геотехнической диагностики железнодорожного пути, предусматривавшие непосредственную оценку риска неблагоприятных воздействий по данным аэрокосмической съемки, продемонстрировали недостаточную эффективность в условиях применения в составе работ по текущему содержанию инфраструктурных объектов в сложных инженерно-геологических условиях, характерных для данного участка. Риск разрушительного воздействия потенциально опасных процессов на объекты инфраструктуры зависит от ландшафтных и гидрологических характеристик, строения формирующих склоны пород, состояния растительного и почвенного покрова, а также от наличия, характеристик и состояния инженерных защитных сооружений. Поэтому окончательная оценка степени опасности в пределах отдельных участков должна осуществляться по результатам специализированных полевых обследований. Наличие развитой системы регулярных осмотров, периодических инструментальных обследований состояния пути, инженерно-геологических

Характеристики используемых данных ДЗЗ

Спутник	Кол-во каналов	Номера каналов	Спектральные диапазоны, мкм	Пространственное разрешение, м	Радиометрическое разрешение, bit/pix	Полоса обзора, км
Данные высокого разрешения						
SPOT-5	5	PAN	0,48 - 0,71	2,5	8	60
		1	0,50 - 0,59	10		
		2	0,61 - 0,68			
		3	0,78 - 0,89			
		4	1,58 - 1,75			
SPOT-6	5	PAN	0,45 - 0,75	1,5	8	60
		1	0,45 - 0,52	6		
		2	0,53 - 0,59			
		3	0,63 - 0,70			
		4	0,76-0,89			
Данные сверхвысокого разрешения						
GeoEye	5	PAN	0,45 - 0,80	0,5	11	15,2
		1	0,45 - 0,51	2		
		2	0,51 - 0,58			
		3	0,66 - 0,69			
		4	0,78 - 0,92			
WorldView-2	9	PAN	0,45 - 0,80	0,5	11	16,4
		1	0,40 - 0,45	2		
		2	0,45 - 0,51			
		3	0,51 - 0,58			
		4	0,58 - 0,62			
		5	0,63 - 0,69			
		6	0,70 - 0,74			
		7	0,77 - 0,89			

обследований и режимных наблюдений на проблемных участках отличает эксплуатацию железнодорожной инфраструктуры от других распределенных геотехнических систем, обеспечивая безопасность перевозок с заданной пропускной способностью.

Модернизация разработанных технологических решений системы мониторинга с целью ее адаптации к особенностям эксплуатации на железнодорожном транспорте проведена в 2011 г. с участием МГУПС (МИИТ), МГУ им. М.В. Ломоносова и ИТЦ «СКАНЭКС». При этом основной акцент использования методов ДЗЗ перенесен на предоставление объективной информации о процессах на прилегающей к железной дороге территории для оценки степени опасности их воздействия на объекты инфраструктуры в ходе диагностических работ на выявленных проблемных участках. Тематическая обработка материалов спутниковой съемки с использованием методов ландшафтно-геоморфологического дешифрирования позволяет выявлять участки развития потенциально опасных экзогенных геоморфологических процессов и характеризовать возможную степень их влияния на объекты железнодорожной инфраструктуры. Кроме того, дешифрирование снимков позволяет осуществлять контроль состояния защитной пляжной полосы и волнозащитных сооружений, а также выявлять участки возможного разрушения водоотводных и дренажных сооружений в связи с интенсивным хозяй-

ственным освоением прилегающей к железной дороге территории. Предложенная технологическая схема проведения работ успешно используется на участке Туапсе – Адлер с 2011 года [1] и продемонстрировала высокую эффективность.

Работы по тематической обработке материалов спутниковой съемки с использованием методов ландшафтно-геоморфологического дешифрирования заключаются в формировании серии тематических карт прилегающей территории в пределах естественных границ возможного развития процессов, потенциально оказывающих влияние на железнодорожную инфраструктуру. Тематические карты характеризуют представленные ландшафты или природно-территориальные комплексы (ПТК) и приуроченные к ним спектры экзогенных геоморфологических процессов, а также комплексы экзогенных геоморфологических процессов, воздействующих на железнодорожную инфраструктуру на исследуемом участке.

Исходной информацией для тематической обработки являются данные ДЗЗ высокого (до 1,5 м) и сверхвысокого (0,5 м) пространственного разрешения, формирующие полные покрытия исследуемой территории, прилегающей к железной дороге на участке Туапсе – Адлер за 2010, 2012 и 2013 гг., а также данные цифровой модели рельефа (ЦМР) SRTM (*Shuttle radar topographic mission*) с разрешением 90 м. Характеристики данных ДЗЗ, используемых при формировании покрытий, приведены в таблице.

Дешифрирование проводится с использованием визуально-интерактивных методов и, в ряде случаев, автоматизированных методов обработки. Визуально-интерактивные методы заключаются в анализе полученной съемки экспертом-дешифровщиком и создании на основе этого анализа картографических слоев, отображающих пространственное распределение исследуемого объекта или проявления процесса. Автоматизированные методы могут быть использованы при анализе мультиспектральной съемки для ускорения процесса дешифрирования и повышения объективности получаемого результата.

Традиционно методики тематического дешифрирования данных ДЗЗ базируются на использовании комплекса дешифровочных признаков, которые включают информацию о разнообразных характеристиках исследуемого объекта. Применительно к описанным выше задачам исследования ландшафтных характеристик и выявления косвенных признаков проявления экзогенных процессов может применяться весь комплекс дешифровочных признаков, который включает:

- спектральный облик объекта;
- цвет объекта в определенном спектральном синтезе;
- размер и форму объекта;
- структуру изображения объекта;
- четкость границ объекта;
- наличие и форму теней объектов;
- положение объекта относительно других элементов местности и рельефа.

Кроме того, при дешифрировании используется комплекс косвенных и дополнительных признаков, которые позволяют идентифицировать объект, определить его границы и состояние [6].

В общем виде методика дешифрирования включает следующие необходимые этапы:

- Получение исходных данных ДЗЗ;
- Предварительная технологическая обработка данных ДЗЗ, включающая уточнение геопривязки и, при необходимости, ортотрансформирование, создание ортофотопланов на основе цветосинтезированных мозаичных покрытий;
- Создание геоинформационного проекта территории обследования;
- Проведение зонирования территории по ландшафтным условиям и особенностям рельефа;
- Для каждой выделенной зоны определение комплекса возможных факторов воздействия и процессов, потенциально оказывающих влияние на состояние и исправность инфраструктурных объектов;
- Детальный анализ выделенных зон с целью выявления реально действующих факторов и активных процессов;
- Создание векторных слоев, содержащих в атрибутивной базе данных информацию о выявленных зонах,

процессах и явлениях, степени их потенциальной опасности;

- Совмещение в рамках ГИС-проекта полученной информации с имеющейся информацией о проявлениях экзогенных процессов с последующим совместным анализом;
- Планирование полевой верификации по результатам проведенного обследования;
- Подготовка отчетных материалов.

Предварительная обработка спутниковых снимков – привязка, ортотрансформирование, тональная балансировка и сшивка мозаик проводится с использованием программного обеспечения ScanEx Image Processor v. 4.0. Географическая координатная привязка данных SPOT-5 и SPOT-6 проводится в интерактивном режиме с использованием метода расстановки опорных точек и полиномиальных алгоритмов трансформации изображений. В качестве источника координат для уточнения геопривязки выбраны ортотрансформированные снимки с аппаратов GeoEye и WorldView-2 с пространственным разрешением 0,5 м, имеющие исходную точность геопривязки 3 м и 6,5 м. Ортотрансформирование полученных покрытий проводится с использованием ЦМР SRTM. Итоговые мозаики данных ДЗЗ представлены в зональной проекции UTM (*Universal Transverse Mercator*) на сфероиде WGS-84 (*World Geodetic System 1984*).

Получаемые комбинированные ортотрансформированные мозаичные покрытия с разрешением 0,5 м в трехкилометровой полосе вдоль полосы отвода и с разрешением от 1,5 до 2,5 м по остальной территории подвергаются визуально-интерактивному дешифрированию с созданием базового картографического слоя ПТК. Визуально-интерактивное дешифрирование осуществляется с использованием программных комплексов ArcGIS 10.2.1 и QGIS v.2.0. При дешифрировании используется как цветовой синтез снимков в видимых спектральных каналах (красный-зеленый-синий), так и комбинация видимых и инфракрасного каналов (БИК-красный-зеленый).

При анализе снимка в варианте синтеза с БИК каналом повышается контраст многих деталей ландшафта, облегчается выявление водных объектов, участков открытого грунта, асфальта, зданий и сооружений на фоне растительности, а также улучшается разделение разных типов растительности, например, лиственных и хвойных пород, и выявление участков угнетенного состояния растительности. Данные SPOT-5 содержат расширенный набор спектральных каналов, включающий ближний и средний инфракрасный (SWIR) каналы. Это позволяет по косвенным признакам выявлять зоны повышенного увлажнения почвенного покрова, локализовывать границы разных типов осадочных и горных пород. Исходное радиометрическое разрешение 11 бит сверхвысокодетальных данных

позволяет осуществлять анализ деталей ландшафта на теневых или пересвеченных участках путем динамической настройки гистограммы отображения.

Применение комбинированных покрытий данных сверхвысокого и высокого разрешения позволяет удешевить и упростить работу по тематическому дешифрированию территории большой площади. Приоритетные участки (буферная полоса вдоль железной дороги, прилегающие к ней склоны, населенные пункты, долины рек) требуют детального дешифрирования по снимкам с максимальным пространственным разрешением. По остальной территории, оказывающей косвенное воздействие на функционирование железной дороги, допустимо дешифрирование относительно более крупных объектов и образований, соответствующих масштабу 1:25 000.

Выделение элементарных природно-территориальных комплексов проводится на основе анализа размещения растительного покрова на местности (древесно-кустарниковая или травянистая растительность или открытые участки без растительности), анализа морфологии поверхности (речная пойма, надпойменная терраса, склоны, водораздельные участки, морское побережье), анализа антропогенного воздействия на природные ПТК (плотная городская и сельская застройка, земли сельскохозяйственного назначения, участки с открытым грунтом и нарушенным почвенно-растительным покровом - строительные площадки, карьеры, грунтовые отсыпки дорог). Пример формируемой карты ПТК представлен на рис. 1.



Рис.1. Фрагмент карты природно-территориальных комплексов. Цифрами на карте обозначены природно-территориальные комплексы: 1 – склоны с древесно-кустарниковой растительностью; 2 – луговые ПТК, склоны с разреженным древесно-кустарниковым покровом; 3 – склоны без растительного покрова с выходами коренных пород; 4 – плотная жилая, промышленная застройка; 5 – земли сельскохозяйственного назначения; 6 – коммуникации, карьеры, отсыпки и прочие; 7 – абразионные берега.

Формирование карты спектров экзогенных процессов, приуроченных к типизированным ПТК, основано на анализе специфики ландшафтных выделов, генезиса их формирования и взаимного расположения соседних выделов с учетом параметров рельефа. Выделяются субго-

ризональные участки ландшафтных выделов (с уклоном менее 7°), характеризующиеся специфическими условиями развития процессов. В целом, границы распространения отдельных спектров совпадают с границами ПТК [7, 8]. Пример карты спектров экзогенных процессов представлен на рис.2. Карта обеспечивает возможность анализа взаимного влияния процессов в пределах соседних ландшафтов и возможной активизации процессов с учетом ландшафтных особенностей, направления уклона поверхности и наличия путей транзита воздействий, в первую очередь, постоянных водотоков, тальвегов, дорожной сети. Кроме того, данная карта позволяет анализировать территории водосбора отдельных водотоков, выявляя удаленные от железной дороги зоны развития экзогенных процессов, которые могут оказать влияние на состояние инфраструктуры.



Рис. 2. Фрагмент карты спектров экзогенных процессов. Цифрами на карте обозначены спектры экзогенных процессов: 1 – дефлюкционно-оползневой склоновой лесной; 2 – дефлюкционно-оползневой склоновой луговой; 3 – обвальнo-осыпной скальных обнажений; 4 – антропогенный на участках плотной застройки; 5 – флювиальный пойменный; 6 – антропогенный на карьерах, свалках, отсыпках и пр.; 7 – абразионно-аккумулятивный морской. Штриховкой показаны субгоризонтальные участки с уклоном менее 7°, толстыми линиями показаны водоразделы.

Карта комплексов экзогенных процессов, воздействующих на инфраструктуру железной дороги, формируется путем проецирования спектров экзогенных процессов на ось железной дороги с учетом рельефа местности. Осуществляется линейное зонирование дороги с выделением преобладающих воздействий. Дополнительно на карте отображаются источники потенциально опасных воздействий – участки возможного перекрытия русел водотоков, переходы через водотоки (мостовые, трубопроводные), способствующие образованию запруд и дальнейшему подтоплению с возможным прорывом и формированием селевых потоков, подпорные водоемы, также способные спровоцировать селевые потоки при прорыве дамб, участки ландшафтных изменений, свидетельствующие об активизации природных процессов или о дополнительном антропогенном воздействии, которое может спровоцировать такую активизацию.

Итогом работ по ландшафтно-геоморфологическому дешифрированию спутниковых снимков является набор карт в масштабе 1:25 000:

- карта природно-территориальных комплексов на район железной дороги участка Туапсе – Адлер;
- карта спектров экзогенных геоморфологических процессов на район железной дороги участка Туапсе – Адлер;
- карта комплексов экзогенных геоморфологических процессов, воздействующих на инфраструктуру железной дороги на участке Туапсе – Адлер.

Отображение полученных результатов в распределенной геоинформационной системе «Геопортал РЖД», функционирующей в закрытой сети передачи данных СПД, позволяет осуществлять анализ возможных воздействий экзогенных процессов на железнодорожную инфраструктуру с большей детальностью, соответствующей пространственному разрешению спутниковых снимков (0,5 м в буферной зоне вдоль железной дороги).

Результаты работ используются для рационального планирования маршрутов полевых обследований за пределами полосы отвода и выбора приоритетных участков обследований при проведении диагностических работ на объектах железнодорожной инфраструктуры, в ходе которых осуществляется оценка степени опасности воздействия склоновых (оползневых и обвально-осыпных) и русловых процессов и вырабатываются рекомендации по совершенствованию инженерной защиты. Карты могут также использоваться для предварительной оценки объемов работ по строительству и реконструкции защитных сооружений и размещению систем наземной сигнализации.

Проведенные в 2011–2013 годах работы продемонстрировали высокую эффективность совместного использования материалов спутниковой съемки и данных полевых обследований. Материалы спутниковой съемки обеспечили возможность высокоточного картографирования не только зоны прохождения железной дороги и полосы отвода, но и прилегающей территории, в пределах которой может проходить активизация геоморфологических процессов, воздействующих на объекты железнодорожной инфраструктуры. Без использования спутниковых данных трудозатраты на проведение полевых работ, а стало быть, сроки их завершения и стоимость были бы существенно выше, а достоверность и полнота результатов диагностических работ была бы существенно ниже и могла оказаться недостаточной для получения полноценной картины воздействующих на железную дорогу процессов и явлений. Достоверность полученных в результате диагностических работ оценок степени опасности экзогенных воздействий подтверждается путем сравнения прогнозируемого по результатам работ 2011 года и фактического количества случаев разрушительных воздействий на путь

на данном участке за 2012–2013 годы. Первоочередная реализация мер по ремонту, укреплению и строительству защитных сооружений на наиболее опасных участках в условиях ограниченных ресурсов позволила предотвратить ряд аварийных ситуаций, связанных с прогнозировавшимися опасными воздействиями.

Литература

1. Василейский А.С., Михайлов С.И., Черноморец С.С. Мониторинг потенциально опасных воздействий на объекты железнодорожной инфраструктуры на участке Туапсе-Адлер с использованием данных спутниковой съемки / Земля из космоса – наиболее эффективные решения, шестая международная конференция 2-4 октября 2013 г. Сборник тезисов.- М.: ИТЦ «СКАНЭКС», НП «Прозрачный мир», 2013 г.- С.93-95.
2. Гафаров Н.А., Баранов Ю.Б., Ванярхо М.А., Филатов Д.М., Денисевич Е.В., Кантемиров Ю.И., Кулапов С.М., Фейгин А.Е., Горайнов М.С., Киселевский Е.В., Никифоров С.Э. Использование космической информации в газовой промышленности.- М.: ООО «Газпром экспо», 2010.- 132 с.
3. Железнов М.М., Василейский А.С., Макаров И.Ю. Мониторинг потенциально опасных воздействий на железнодорожную инфраструктуру с использованием космических систем ДЗЗ // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта.- 2010, № 6.- С.16-19.
4. Железнов М.М., Сазонов Н.В., Василейский А.С. Спутниковый мониторинг потенциально-опасных участков железнодорожного пути // 4-я Международная научно-практическая конференция «Геопространственные технологии и сферы их применения», Москва, 12-13 марта 2008 г. Материалы конференции.- М.: Информационное агентство «ГРОМ», 2008.- С. 54-56.
5. Инженерные изыскания для строительства: практика и опыт Мосгоргеотреста / Гл. ред. Антипов А.В., Осипов В.И.- М.: ООО Издательство «Прспект», 2012.- 352 с.
6. Савостин А.А. Анализ крупномасштабных аэрофотоснимков для выявления спектров экзогенных геоморфологических процессов. Деп. ВИНТИ № 2250- В2003 // Вестн. Моск. ун-та.- Сер.5, География.- № 3, 2004.
7. Савостин А.А. Опыт составления крупномасштабной карты спектров экзогенных процессов (на примере бассейна р. Адыл-Су, Приэльбрусье) // Вестн. Моск. Ун-та.- Сер.5, География.- № 4, 2004.- С.48-52.
8. Савостин А.А. Сравнительный анализ содержания геоморфологических карт в целях прогноза опасных процессов (на примере Кавказа): Автореф. дисс. ... канд. геогр. наук.- М., 2005.- 24 с.

Василейский А.С., Карелов А.И., ОАО «НИИАС», Москва

Верификация результатов радиолокационного мониторинга геодинамических процессов на участке Туапсе-Адлер

Введение

Современные спутниковые радиолокационные съемочные системы оснащены радиолокационной аппаратурой бокового обзора, что обуславливает специфическую геометрию съемки земной поверхности с существенным отклонением оси съемки от надира и возникновение ряда специфических искажений геометрии объектов на регистрируемых снимках [3]. Высокое пространственное разрешение достигается за счет искусственного синтеза антенной решетки большой апертуры, и, следовательно, узкой диаграммы направленности антенны при орбитальном движении спутника путем когерентной обработки сигналов, зарегистрированных в разных точках орбиты. Регистрируемая бортовой аппаратурой информация содержит как амплитудную составляющую сигнала, так и фазовую компоненту, характеризующую расстояние до объектов на местности. Это позволяет путем специальной дифференциальной интерферометрической обработки данных съемки с близких участков орбиты в разное время обеспечивать оценку смещений земной поверхности или объектов на местности с чрезвычайно высокой точностью, достигающей сотых долей длины волны используемого радиолокационного сигнала. Ключевой проблемой всех методов дифференциальной интерферометрической обработки радиолокационных данных является необходимость корректной развертки разности фазовых компонент сигнала, изначально регистрируемых по модулю 2π , и разрешения возникающей при этом неоднозначности восстановления разности фаз, характеризующей искомого смещение. Данная проблема существенно усложняется в случае наблюдения относительно интенсивных смещений (до долей длины волны за время между съемками), а также при наличии на исследуемой территории большой доли участков, отражающих радиолокационный сигнал с низкой когерентностью, например, покрытых развитым растительным покровом. Это затрудняет применение метода радиолокационной интерферометрии на залеженных территориях и наблюдение динамично развивающихся процессов.

Тем не менее, метод радиолокационной интерферометрии в настоящее время широко применяется в ряде отраслей хозяйственной деятельности для оценки влияния на здания, сооружения и протяженные инфраструктурные объекты геодинамических воздей-

ствий, связанных с неотектоническими процессами, добычей полезных ископаемых, криогенными и карсто-суффозионными процессами, изменением гидрогеологических условий и набуханием грунта [4, 5, 8]. В большинстве случаев регистрируемое спутниковой радиолокационной системой смещение объектов в проекции на ось съемки позволяет напрямую оценивать величину реального вертикального смещения (просадки или подъема) земной поверхности и объектов на ней с учетом наклонной геометрии регистрации снимков. Данный метод является уникальным инструментом исследования геодинамики, обеспечивая одномоментную регистрацию процессов в широкой полосе обзора с высокой детальностью (несколько тысяч точек измерений на квадратный километр). Дополнительные работы по измерениям величин просадок (подъема) геодезическими методами в отдельных пунктах или вдоль профилей, секущих зоны деформаций, позволяют верифицировать получаемые интерферометрическими методами карты смещений [5, 9, 10], подтверждая субсантиметровый уровень точности оценок, а также обеспечивают калибровку и облегчают интерпретацию результатов.

В ряде случаев, например, при наблюдении склоновых оползневых процессов горизонтальные составляющие реальных смещений объектов на поверхности имеют существенное, зачастую определяющее значение. Величина их вклада в регистрируемые методами радиолокационной интерферометрии значения смещений в проекции на ось съемки зависят от направления. Корректное восстановление полных векторов смещений по результатам спутниковой радиолокационной интерферометрии требует в этом случае привлечения дополнительной информации – результатов интерферометрической съемки с другой геометрией (с другой орбиты спутника), информации о рельефе, а также учета предполагаемого характера движения объектов на оползневом склоне [6, 13]. Комплексование метода радиолокационной интерферометрии и высокоточных геодезических методов оценки смещений в отдельных точках склона существенно облегчает интерпретацию результатов и позволяет получить достоверную и детальную картину развития оползневого процесса.

Спутниковый радиолокационный мониторинг оползневых процессов

Применение метода спутниковой радиолокационной интерферометрии для мониторинга потенциально опасных природно-техногенных воздействий на объекты железнодорожной инфраструктуры с 2010 г. реализуется на участке Туапсе – Адлер Северо-Кавказской железной дороги. Оползневые процессы распространены на значительной части протяженности этого участка и являются преобладающей причиной регистрируемых на нем опасных воздействий на путь и другие объекты железнодорожной инфраструктуры. Разработанная ОАО «НИИАС» технологическая схема работ основана на использовании результатов радиолокационной съемки высокого пространственного разрешения, осуществляемой спутниковой группировкой COSMO-SkyMed, а также спутниковой съемки в видимой и ближней инфракрасной зонах спектра [7].

Дифференциальная интерферометрическая обработка серий разновременных радиолокационных снимков по методу PSP (Persistent Scatterer Pairs), разработанному специалистами компании e-GEOS [11], позволяет строить детальные карты, отображающие скорости смещения большого количества выявляемых так называемых устойчивых отражателей (УО) радиолокационного сигнала. Устойчивыми отражателями, сохраняющими свойства отражения и рассеивания радиолокационного сигнала в период между разновременными съемками, являются здания, сооружения, элементы конструкций, а также участки земной поверхности, не покрытые растительностью. Применение метода PSP позволяет выявлять большое количество формирующих плотную сеть УО и осуществлять измерения их смещений с субсантиметровым уровнем точности [12]. Примеры фрагментов карты смещений по результатам дифференциальной интерферометрической обработки радиолокационной съемки в 2010–2011 годах по участку Дагомыс – Хоста приведены на рис. 1. Выявленные УО отмечены маркерами, яркость которых соответствует средней скорости смещения (на рис. 1 показан только тематический слой смещений в черно-белом полутоновом отображении; на оригинальной карте УО отмечаются цветными маркерами на подложке спутникового снимка сверхвысокого пространственного разрешения). Анализ карт смещений позволяет картировать области опасных геодинамических процессов и выявлять участки их воздействия на железнодорожное полотно и объекты инфраструктуры, осуществлять мониторинг оползневых склонов, на ранней стадии обнаруживать активизацию опасных процессов, осуществлять контроль стабильности зданий и сооружений, а также оценку эффективности проводимых мероприятий по защите инфраструктуры от разрушительных воздействий.

Технология радиолокационного мониторинга предполагает формирование стартового набора из 35 снимков с аппаратов группировки COSMO-SkyMed и последующее ежемесячное его пополнение новыми снимками, формирующими интерферометрическую цепочку. Даты съемки использовавшихся снимков за 2010–2012 годы приведены в табл. 1.

Особенностью метода PSP является отсутствие жестких ограничений на модель предполагаемых смещений УО во времени при развертке фазы (во многих других методах предполагается линейное смещение), что позволяет анализировать зоны активизации геодинамических процессов, характеризующиеся возрастающей скоростью смещений [11, 12]. При этом получаемые оценки смещений во времени в ряде случаев характеризуются дополнительной к общему тренду знакопеременной шумоподобной составляющей (см. рис. 2 далее по тексту), позволяющей предположить наличие ошибок, например, связанных с ошибками развертки фазы радиолокационного сигнала при обработке. Проведенные в 2012 году работы по верификации результатов спутникового радиолокационного мониторинга были призваны обеспечить проверку точности применяемого метода радиолокационной интерферометрии независимыми высокоточными измерениями.

Методика и результаты верификации

Работы по верификации проводились ОАО «НИИАС» совместно с ОАО «НПК «РЕКОД» – головной организацией Федерального космического агентства по реализации проектов в области использования результатов космической деятельности. В рамках федеральной целевой программы «Глобальная навигационная система» на 2002–2012 годы на участке Туапсе – Адлер Северо-Кавказской железной дороги реализован пилотный проект по созданию типовой системы спутникового мониторинга и прогнозирования природно-техногенных опасностей при эксплуатации железной дороги с использованием радионавигационной системы ГЛОНАСС/GPS [1], включающей систему высокоточного позиционирования (СВТП). Верификация результатов спутниковой радиолокационной интерферометрии осуществлялась путем повторяющихся геодезических спутниковых навигационных измерений смещений грунтовых реперов, закрепленных в выявленных районах активных геодинамических процессов [2]. Конструкция реперов предусматривала надежное закрепление в грунте на глубину около 1 м для оценки смещения грунтового массива на оползневую поверхность скольжения и жесткое центрированное крепление съемной навигационной антенны для проведения ежемесячных измерений местоположения репера. Декларируемая точность спутниковых

Перечень радиолокационных снимков со спутников группировки COSMO-SkyMed за 2010–2012 годы, использовавшихся в ходе работ

№	Спутник	Дата съемки	№	Спутник	Дата съемки	№	Спутник	Дата съемки
стартовый набор:			18	CSK3	13.12.2010	обновления 2011 г.:		
1	CSK2	22.08.2010	19	CSK2	28.12.2010	36	CSK3	23.04.2011
2	CSK3	23.08.2010	20	CSK3	29.12.2010	37	CSK3	21.05.2011
3	CSK1	30.08.2010	21	CSK1	05.01.2011	38	CSK3	23.06.2011
4	CSK2	07.09.2010	22	CSK2	13.01.2011	39	CSK2	24.07.2011
5	CSK2	23.09.2010	23	CSK3	14.01.2011	40	CSK2	25.08.2011
6	CSK3	24.09.2010	24	CSK1	21.01.2011	41	CSK2	26.09.2011
7	CSK1	01.10.2010	25	CSK2	29.01.2011	42	CSK1	20.10.2011
8	CSK2	09.10.2010	26	CSK1	06.02.2011	43	CSK1	21.11.2011
9	CSK1	17.10.2010	27	CSK2	14.02.2011	44	CSK2	15.12.2011
10	CSK2	25.10.2010	28	CSK3	15.02.2011	обновления 2012 г.:		
11	CSK1	02.11.2010	29	CSK1	22.02.2011	45	CSK4	20.01.2012
12	CSK2	10.11.2010	30	CSK2	02.03.2011	46	CSK2	17.02.2012
13	CSK1	18.11.2010	31	CSK1	10.03.2011	47	CSK1	12.03.2012
14	CSK2	26.11.2010	32	CSK2	18.03.2011	48	CSK1	20.09.2012
15	CSK3	27.11.2010	33	CSK3	19.03.2011	49	CSK1	22.10.2012
16	CSK1	04.12.2010	34	CSK1	26.03.2011	50	CSK1	23.11.2012
17	CSK2	12.12.2010	35	CSK2	03.04.2011	51	CSK1	25.12.2012

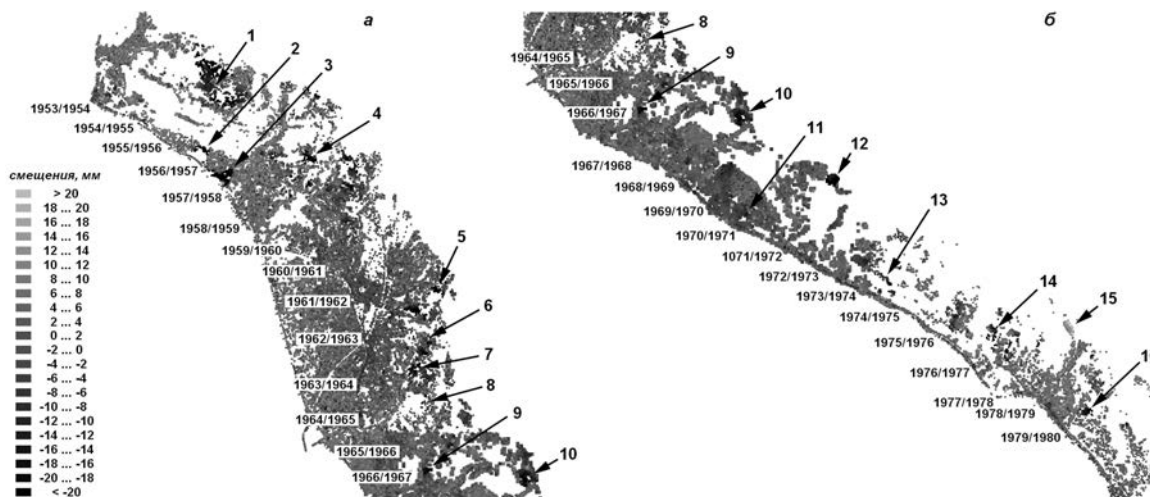


Рис. 1. Фрагменты карты смещений по участкам 1854–1966 км (а) и 1965 – 1980 км (б), полученной по результатам дифференциальной интерферометрической обработки 44 радиолокационных снимков спутниковой группировкой COSMO-SkyMed в 2010–2011 гг. Цифрами отмечены зоны активных геодинамических процессов, отобранные для верификации.

навигационных измерений координат реперов при накоплении регистрируемых навигационных сигналов на протяжении не менее 6 ч и последующей обработке в дифференциальном режиме совместно с сигналами, регистрируемыми шестью постоянно действующими референсными станциями СВТП, характеризовалась величиной среднеквадратического отклонения планового положения 2 мм [1].

Анализ карты смещений по участку Дагомыс – Хоста протяженностью около 30 км (фрагменты карты представлены на рис. 1) позволил выделить несколько десятков зон, демонстрирующих смещения

со среднегодовыми скоростями более 20 мм/год. 16 зон, представляющих обширные области активных геодинамических процессов с наибольшими смещениями по результатам радиолокационной интерферометрии, были выбраны в качестве кандидатов для геодезических измерений (отмечены цифрами на рис. 1). Отметим, что в части зон (№ 6 и № 15) по данным радиолокационной интерферометрии наблюдаются существенные положительные смещения (приближение к спутнику, на рис.1 показаны светло-серым цветом), которые могут ошибочно интерпретироваться как поднятия поверхности, на самом деле отображая

оползни на склонах, ориентированных в направлении на спутник.

В ходе проведенных в начале 2012 г. полевых обследований во всех зонах были выявлены признаки активных оползневых процессов – следы деформаций зданий и сооружений, искривлений и разрывов трубопроводов газо- и водоснабжения и канализации, растрескивание и проседание участков дорожного покрытия, характерное искривление древесной растительности, раскрытие трещин и формирование уступов на поверхности земли. По результатам обследований для закрепления грунтовых реперов были выбраны 5 зон активных геодинамических процессов (№№ 2, 4, 10, 13, 15), расположенные в микрорайонах Мамайка, Бытха, в районе улиц Целинная и Самшитовая и на склоне г. Ахун. Выбор этих зон был обусловлен возможностью заложения грунтовых реперов с хорошими условиями для приема радионавигационных сигналов, транспортной доступностью, а также различной ориентацией склонов и предполагаемыми направлениями смещений объектов на поверхности. Только одна из выбранных зон располагается в непосредственной близости от железной дороги (№ 2 – в микрорайоне Мамайка). Графики смещений отдельных УО, характерных для выбранных зон, за 2010-2011 годы показаны на рис. 2. Средние скорости смещений УО, зарегистрированные за время наблюдения (V), показаны на рис. 1. Смещения на оползневом склоне, ориентированном в западном направлении (на спутник), в зоне № 15 (рис. 2, д) имеют положительные значения. При накоплении стартового набора из 35 радиолокационных снимков с августа 2010 г. по март 2011 г. съемка осуществлялась с максимально возможной частотой. На графиках (особенно в левой части при более частой съемке в процессе накопления стартового набора снимков) хорошо заметна шумоподобная знакопеременная составляющая амплитудой до 10 мм.

Навигационные измерения местоположения реперов проводились ежемесячно на протяжении 2012 года. Результаты геодезических измерений смещений реперов представлены в таблицах 2–6. Смещения по широте, долготе и высоте обозначены в таблицах D_B , D_L и D_H соответственно, оценки точности геодезических измерений местоположения реперов по внутренней сходимости обозначены s_B , s_L , s_H . Отметим несколько худшую точность измерений по высоте по сравнению с точностью измерений плановых координат, присущую спутниковому навигационному методу измерений. Отметим также, что в процессе проведения работ в непосредственной близости от репера в зоне № 4 (в районе ул. Целинная) был установлен металлический электрораспределительный шкаф, что привело к резкому снижению точности навигационных измерений вследствие экранирования и переотражения части радио-

навигационных сигналов со спутников ГЛОНАСС/GPS, а также могло привести к нарушению закрепления репера в грунте и его дополнительным смещениям. Измерения на этом репере были прекращены с ноября 2012 года. Грунтовый репер в зоне № 10 (в микрорайоне Бытха) также был затронут строительными работами в ходе эксперимента – на незначительном удалении от репера построено металлическое ограждение, что привело к необходимости изменения угла отсечки навигационных спутников в процессе измерений.

Организация работ по верификации предполагала продолжение ежемесячной съемки и обновления результатов радиолокационной интерферометрии на протяжении 2012 года, что позволило бы напрямую сравнить результаты измерения смещений обоими методами. Однако в связи с особенностями эксплуатации спутниковой группировки COSMO-SkyMed снимки за период с апреля по август 2012 года не были получены, что привело к 5-месячному перерыву в результатах радиолокационной интерферометрии (см. табл. 1).

Анализ результатов верификации

Графики смещений реперов по широте D_B и долготе D_L , полученные по геодезическим измерениям в 2012 г., представлены на рис. 3. На рисунках также отмечены диапазоны среднеквадратических отклонений соответствующих измерений, оцененные по внутренней сходимости. Пунктирными линиями показаны линии трендов средней скорости смещения, отмечены соответствующие значения средней скорости смещения по широте и долготе V_B и V_L . Анализ графиков подтверждает наличие существенных горизонтальных смещений реперов, закрепленных в зонах развития оползневых процессов, особенно ярко выраженных в зоне № 2 (рис.3, а, Мамайка). Характер смещений в большинстве зон имеет нелинейный характер с выраженными знакопеременными составляющими, которые не могут быть объяснены только ошибками навигационных измерений. Отметим, что оценка точности измерений по внутренней сходимости демонстрирует величины ошибок, существенно превышающие (в ряде случаев до 10 раз) декларируемые для системы СВТП 2 мм. Это делает невозможным строгую оценку точности результатов радиолокационной интерферометрии с декларируемой точностью на уровне единиц миллиметров с использованием полученных геодезических измерений смещений реперов. Отметим также, что измеряемые геодезическим методом смещения реперов характеризуют движения грунтовых масс на оползневых склонах, тогда как радиолокационная интерферометрия позволяет оценивать смещения различных объектов (зданий, сооружений, бетонированных или асфальтированных участков), часть из которых может иметь заглубленные основания и перемещаться по склонам вместе с более

Таблица 2

**Результаты геодезических измерений смещения репера в зоне № 2
(в микрорайоне Мамайка г. Сочи)**

Дата измерения	Разность от первого измерения			Плановое смещение, мм	Общее смещение, мм	Оценка точности		
	ΔB , мм	ΔL , мм	ΔH , мм			S_B , мм	S_L , мм	S_H , мм
20.02.2012	-	-	-	-	-	3,7	2,5	7,9
29.02.2012	-8,6	-12,0	8,7	14,8	17,2	3,4	2,2	6,8
29.03.2012	-35,4	-56,7	-24,0	66,8	71,0	5,3	3,6	10,7
25.04.2012	-49,3	-77,6	6,3	92,0	92,2	3,7	2,5	7,3
16.05.2012	-53,9	-91,3	-41,3	106,0	113,7	3,8	2,5	7,4
17.06.2012	-65,0	-94,6	-40,7	114,8	121,8	4,0	3,1	8,7
08.07.2012	-74,5	-103,5	-54,3	127,6	138,6	3,6	2,4	7,2
24.08.2012	-84,4	-106,9	-60,7	136,2	149,1	3,7	2,9	8,5
10.09.2012	-90,9	-114,9	-56,9	146,5	157,1	11,5	8,4	25,8
21.10.2012	-80,7	-115,1	-54,7	140,6	150,9	3,8	2,8	8,7
30.11.2012	-93,9	-125,4	-45,4	156,7	163,1	3,3	2,5	6,9
23.12.2012	-102,9	-137,2	-54,8	171,5	180,0	3,9	2,8	9,0

Таблица 3

**Результаты геодезических измерений смещения репера в зоне № 4
(в районе ул. Целинная г.Сочи)**

Дата измерения	Разность от первого измерения			Плановое смещение, мм	Общее смещение, мм	Оценка точности		
	ΔB , мм	ΔL , мм	ΔH , мм			S_B , мм	S_L , мм	S_H , мм
14.02.2012	-	-	-	-	-	4,7	3,2	10,1
03.03.2012	-2,8	-8,9	6,7	9,3	11,5	6,2	3,9	12,1
27.03.2012	0,9	-19,2	10,2	19,2	21,7	6,2	4,5	14,3
21.04.2012	-3,7	-15,8	-21,9	16,3	27,3	6,0	3,6	11,4
13.05.2012	-4,3	-16,5	-12,3	17,1	21,0	5,7	3,9	12,4
11.06.2012	-0,6	-25,7	5,4	25,7	26,2	9,6	6,6	20,1
07.07.2012	-4,0	-16,3	-30,6	16,8	34,9	5,7	3,6	11,6
22.08.2012	-5,5	-19,2	38,9	20,0	43,7	15,5	11,8	35,5
11.09.2012	-2,8	-16,1	59,1	16,3	61,3	15,1	10,6	35,1
19.10.2012	4,6	-26,3	-5,2	26,7	27,2	26,6	22,5	72,0

Таблица 4

**Результаты геодезических измерений смещения репера в зоне № 10
(в микрорайоне Бытха г.Сочи)**

Дата измерения	Разность от первого измерения			Плановое смещение, мм	Общее смещение, мм	Оценка точности		
	ΔB , мм	ΔL , мм	ΔH , мм			S_B , мм	S_L , мм	S_H , мм
08.02.2012	-	-	-	-	-	4,0	2,9	8,7
17.03.2012	2,8	-17,4	-26,0	17,6	31,4	3,8	2,6	7,4
23.03.2012	2,8	-13,8	-21,9	14,1	26,1	3,5	2,6	7,8
20.04.2012	0,9	-13,8	-10,2	13,9	17,2	3,8	2,5	7,7
17.05.2012	0,3	-11,8	-32,9	11,8	35,0	4,1	2,8	8,1
15.06.2012	-0,6	-19,2	-14,3	19,2	23,9	4,5	3,3	9,3
06.07.2012	-1,2	-8,0	-30,2	8,1	31,3	4,7	3,3	9,5
19.08.2012	0,6	-17,8	3,5	17,9	18,2	5,3	4,0	10,9
12.09.2012	-0,3	-10,9	-51,6	10,9	52,7	11,1	8,0	24,7
18.10.2012	7,4	-20,3	-30,5	21,6	37,4	5,1	3,6	10,9
21.11.2012	8,9	-23,4	-42,4	25,1	49,3	6,4	4,8	14,0
19.12.2012	7,4	-29,2	12,6	30,1	32,7	3,8	2,9	8,7

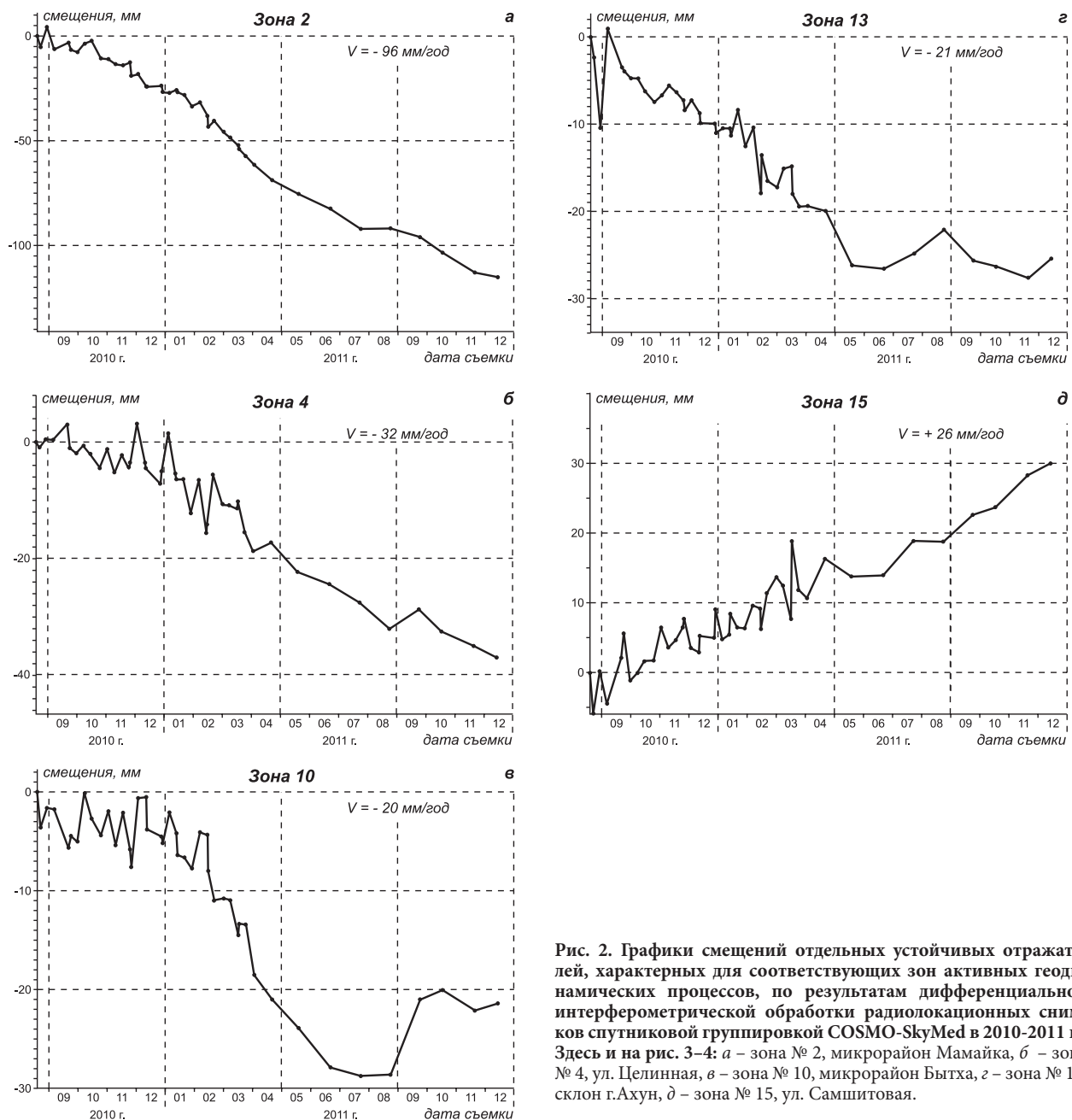


Рис. 2. Графики смещений отдельных устойчивых отражателей, характерных для соответствующих зон активных геодинамических процессов, по результатам дифференциальной интерферометрической обработки радиолокационных снимков спутниковой группировки COSMO-SkyMed в 2010-2011 гг. Здесь и на рис. 3–4: а – зона № 2, микрорайон Мамайка, б – зона № 4, ул. Целинная, в – зона № 10, микрорайон Бытха, г – зона № 13, склон г.Ахун, д – зона № 15, ул. Самшитовая.

глубокими слоями породы. Сами грунтовые реперы не являются УО, т.к. заложены после начала формирования интерферометрической цепочки снимков. Таким образом, в процессе верификации может быть получено только подтверждение характера смещений, регистрируемых методом радиолокационной интерферометрии в зонах активных геодинамических процессов.

На рис. 4 представлены зарегистрированные траектории перемещений грунтовых реперов в плане. Все траектории демонстрируют существенные общие горизонтальные смещения реперов за 2012 г. в направлениях уклона (падения) соответствующих оползневых склонов. Репер в зоне № 2 (рис. 4, а, Мамайка) демонстрирует наибольшее смещение на величину почти

20 см. Во всех случаях зарегистрированы достаточно сложные траектории, имеющие знакопеременную составляющую амплитудой до 1 см. Колебательные движения реперов могут объясняться как ошибками геодезических измерений, так и реальными процессами на оползневых склонах, связанными со складчатым движением грунтовых масс или набуханием и усыханием глинистого грунта.

Непосредственное сравнение результатов геодезических измерений смещений грунтовых реперов с результатами радиолокационной интерферометрии по ближайшим УО за 2012 год возможно только в проекции на ось съемки спутниковой радиолокационной системы, характеризующейся для данной интерферо-

Таблица 5

Результаты геодезических измерений смещения репера в зоне № 13
(на склоне г. Ахун, Хостинский район г. Сочи)

Дата измерения	Разность от первого измерения			Плановое смещение, мм	Общее смещение, мм	Оценка точности		
	ΔB , мм	ΔL , мм	ΔH , мм			S_B , мм	S_L , мм	S_H , мм
07.02.2012	-	-	-	-	-	5,5	4,1	12,6
28.02.2012	-6,2	1,1	-8,6	6,3	10,6	3,1	2,1	6,0
22.03.2012	-19,1	-2,9	7,3	19,3	20,6	3,1	2,2	6,8
06.04.2012	-25,9	-9,4	-10,5	27,5	29,5	4,1	2,8	8,5
05.05.2012	-27,7	-10,5	-23,1	29,6	37,6	2,7	1,9	5,8
08.06.2012	-36,0	-8,7	-4,7	37,1	37,4	3,4	2,2	6,5
05.07.2012	-34,5	-1,6	-22,7	34,5	41,3	3,2	2,3	7,0
18.08.2012	-41,3	-11,6	-11,2	42,9	44,3	9,4	7,3	20,2
17.09.2012	-42,5	-10,5	2,0	43,8	43,8	5,1	4,0	11,0
22.10.2012	-33,9	-0,4	-20,9	33,9	39,8	9,3	7,4	21,2
20.11.2012	-33,0	-6,2	-19,5	33,5	38,8	5,4	4,2	11,9
14.12.2012	-36,3	-7,8	-25,4	37,2	45,0	3,4	2,7	7,6

Таблица 6

Результаты геодезических измерений смещения репера в зоне № 15
(в районе ул. Самшитовая, Хостинский район г. Сочи)

Дата измерения	Разность от первого измерения			Плановое смещение, мм	Общее смещение, мм	Оценка точности		
	ΔB , мм	ΔL , мм	ΔH , мм			S_B , мм	S_L , мм	S_H , мм
30.01.2012	-	-	-	-	-	4,3	3,2	9,8
24.02.2012	-8,9	14,7	-20,7	17,2	26,9	9,4	6,4	19,4
21.03.2012	-4,6	19,0	35,0	19,5	40,1	5,8	4,1	13,2
05.04.2012	3,4	16,7	12,8	17,1	21,3	3,7	2,5	7,9
04.05.2012	3,1	19,9	15,8	20,1	25,6	4,6	3,2	9,4
07.06.2012	5,2	17,6	11,1	18,4	21,5	6,5	4,5	13,6
04.07.2012	-3,7	16,3	53,5	16,7	56,0	5,1	3,6	10,9
06.08.2012	-1,2	19,2	18,1	19,2	26,4	6,2	4,8	14,2
18.09.2012	4,0	20,1	9,0	20,5	22,4	5,0	3,6	10,2
11.10.2012	-2,5	29,9	33,4	30,0	44,9	12,7	8,9	28,6
19.11.2012	1,8	21,9	41,2	21,9	46,7	7,8	5,8	16,8
11.12.2012	-4,9	28,6	21,1	29,0	35,8	3,5	2,7	7,8

Таблица 7

Результаты геодезических измерений смещений грунтовых реперов и оценки скоростей смещений УО по результатам спутниковой радиолокационной интерферометрии за 2012 год

Оценки смещений	Зона № 2	Зона № 4	Зона № 10	Зона № 13	Зона № 15
Общее смещение грунтовых реперов, мм	122	21	10	22	35
Скорость смещения грунтовых реперов, мм/год	-133	-45	-18	-16	+38
Скорости смещения УО, мм/год	-48	-16	-14	-15	+5
	-55	-17	-17	-16	+7
	-55	-23	-20	-22	+10
	-57	-27	-20	-25	+17

метрической цепочки снимков направляющими косинусами от вертикали и направлений на север и восток соответственно $C_H = -0,765579212$, $C_N = 0,07484779$, $C_E = -0,63897283$. Данные для анализа представлены в табл. 7. Общие смещения реперов и средние скорости за год с учетом плановых и вертикальных составляю-

щих приведены в таблице в проекции на ось съемки. Оценки скорости смещений за год по данным радиолокационной интерферометрии в 2012 году приведены для нескольких ближайших характерных УО в соответствующей зоне. Отрицательный знак скорости смещения соответствует удалению объекта от спутника.

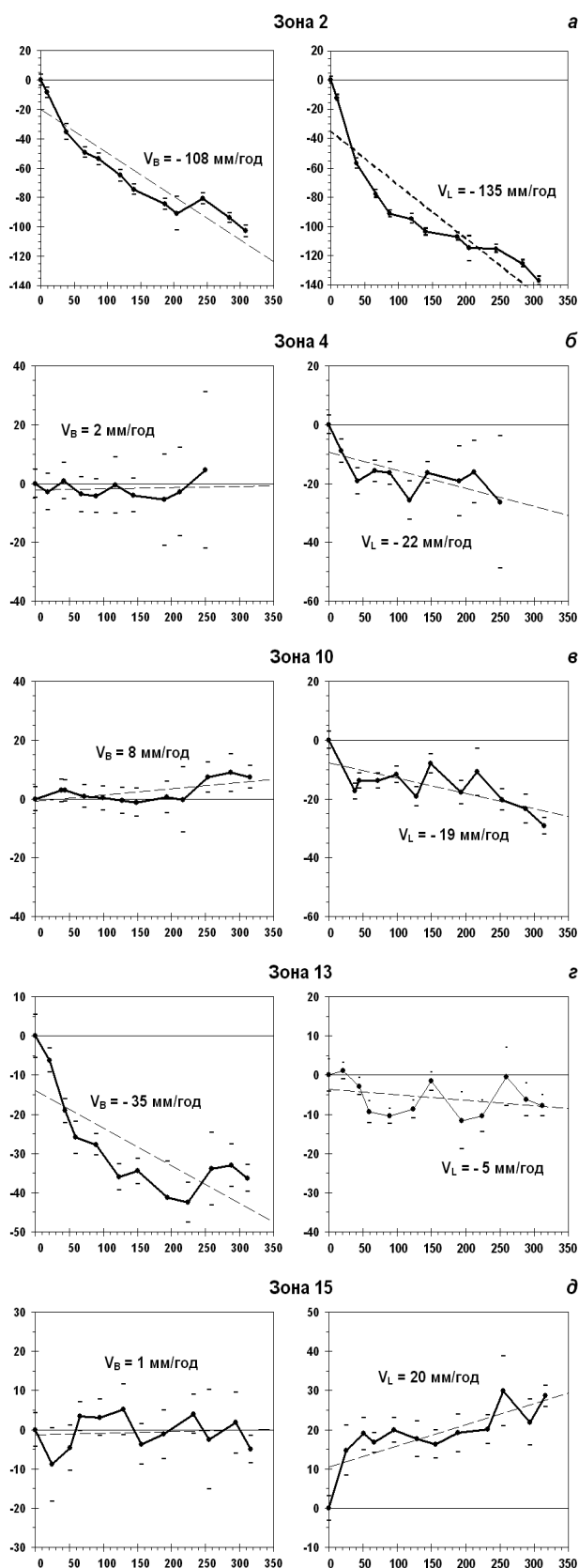


Рис. 3. Графики смещений грунтовых реперов по широте D_B (слева) и долготы D_L (справа) по результатам геодезических измерений. По оси абсцисс отложено время соответствующих измерений с начала 2012 года в днях.

Сравнение показывает, что результаты радиолокационной интерферометрии в целом неплохо согласуются (на качественном уровне) с результатами геодезических измерений смещений грунтовых реперов. Положительные скорости смещений в зоне № 15 (ул. Самшитовая) объясняются движением оползня на относительно пологом склоне, ориентированном на спутник в момент съемки. В зонах с интенсивными оползневыми процессами, в которых зарегистрированные скорости смещения грунтовых реперов превышают 20 мм/год (в микрорайоне Мамайка, на ул. Целинная и ул. Самшитовая), результаты радиолокационной интерферометрии демонстрируют в 2-2,5 раза меньшие скорости смещений УО, что может быть связано с заглублением опор и фундаментов соответствующих им объектов и перемещением их совместно с более глубокими слоями пород на склонах.

Детальный анализ характера смещений грунтовых реперов и УО в процессе верификации затруднен в связи с уже упоминавшимся перерывом в радиолокационной съемке с апреля по август 2012 года. Однако полученные данные позволяют сравнить характер смещений в весенний и осенний периоды, отличающиеся интенсивными атмосферными осадками и соответствующей активизацией оползневых процессов. На рис. 5 приведены результаты геодезических измерений (ГИ) смещений грунтовых реперов в зонах № 10 (микрорайон Бытха) и № 15 (ул Самшитовая) за 2012 год в проекции на ось съемки и смещения ближайших к ним УО по результатам радиолокационной интерферометрии (РЛ) за этот же временной период. Вертикальными пунктирными линиями на рис. 5 показаны границы временных интервалов, характеризующихся одновременным наличием геодезических и радиолокационных измерений (в феврале и с октября по декабрь). Сравнение графиков демонстрирует сходный характер знакопеременных смещений реперов со смещениями большей части ближайших УО в соответствующие временные интервалы. Регистрация таких шумоподобных знакопеременных смещений обоими методами позволяет предположить, что они отражают реальные сложные движения грунтовых масс на оползневых склонах, связанные с образованием складок или набуханием и усыханием глинистых грунтов в связи с изменением обводненности.

Выводы

Проведенные работы по верификации результатов спутниковой радиолокационной интерферометрии при мониторинге геодинамических процессов на оползневых склонах путем повторяющихся геодезических измерений смещений грунтовых реперов позволили подтвердить возможность применения исполь-

зуемых на участке Туапсе – Адлер технологических решений для выявления зон активизации оползней и контроля их движения с использованием регулярной съемки радиолокационной спутниковой группировкой COSMO-SkyMed и дифференциальной интерферометрической обработки по методу PSP. Получаемые данным методом спутниковой радиолокационной интерферометрии результаты достоверно характеризуют не только средние скорости смещений объектов, выделенных при обработке в качестве устойчивых отражателей, в проекции на ось съемки, но и сложные нелинейные во времени движения объектов на оползневых склонах, предположительно вызываемые образованием складок или набуханием и усыханием глинистых грунтов.

Недостаточная точность геодезических измерений смещений реперов с использованием спутниковых навигационных измерений и дифференциальных дополнений глобальной спутниковой навигационной системы ГЛОНАСС/GPS (продемонстрированная на практике точность в 5-10 раз ниже декларируемой) не позволила достоверно оценить точность результатов радиолокационной интерферометрии. Однако субсантиметровый уровень точности данного метода без сомнения подтверждается.

Интерпретация результатов спутниковой радиолокационной интерферометрии на оползневых склонах должна осуществляться с учетом геометрии съемки, характеристик ландшафта, геологических и гидрологических свойств пород и параметров объектов, выделенных при обработке в качестве устойчивых отражателей. При этом необходимо учитывать как вертикальные, так и плановые перемещения объектов на склонах, чувствительность к которым радиолокационной интерферометрии существенно зависит от направления движения (вплоть до полной нечувствительности при движении в плоскости, перпендикулярной оси съемки).

Дополнительное улучшение характеристик метода спутниковой радиолокационной интерферометрии при применении для изучения геодинамических процессов в условиях сложной конфигурации склонов и залесенных территорий может быть достигнуто путем модификации метода PSP для учета информации об уклоне и ориентации склонов непосредственно в процессе построения сети устойчивых отражателей и развертки фазы. При этом может быть достигнута гладкость формируемых оценок скоростей смещения объектов по склонам, а не их проекций на ось съемки. Подобная модификация алгоритма обработки PSP должна обеспечить выявление более густой сети устойчивых отражателей, в том числе в областях активных оползневых процессов.

Литература

1. Бойков В.В., Василейский А.С., Кривдин Д.Г. Система спутникового мониторинга железнодорожной инфраструктуры с использованием высокоточных навигационных технологий ГЛОНАСС/GPS на участке Туапсе – Адлер – Красная Поляна Северо-Кавказской железной дороги // 7-я Международная научно-практическая конференция «Геопространственные технологии и сферы их применения», Москва, 16-17 марта 2011 г. Материалы конференции.- М.: Информационное агентство «ГРОМ», 2012.- С.85-87.
2. Василейский А.С., Кривдин Д.Г., Бойков В.В., Данилушкина А.А. Сравнение двух спутниковых технологий мониторинга потенциально опасных процессов на железнодорожном транспорте / Труды 2-й научно-технической конференции «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте» ИСУЖТ-2013, Москва, 21-22 октября 2013 г. - М.: ОАО «НИИАС».- 2013.- С.150-155.
3. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / Под ред. В.С.Вербы.- М.: Радиотехника, 2010.- 680 с.
4. Гафаров Н.А., Баранов Ю.Б., Ванярхо М.А., Филатов Д.М., Денисевич Е.В., Кантемиров Ю.И., Кулапов С.М., Фейгин А.Е., Горяйнов М.С., Киселевский Е.В., Никифоров С.Э. Использование космической информации в газовой промышленности.- М.: ООО «Газпром экспо», 2010.- 132 с.
5. Горный В.И., Крицук С.Г., Латыпов И.Ш., Оловянный А.Г., Тронин А.А. Знакопеременные вертикальные движения земной поверхности по данным космической радиолокационной съемки (на примере Санкт-Петербурга) / Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. Сборник научных статей.- Том 7, № 2.- М.: ООО «ДоМира», 2010.- С.321-332.
6. Дмитриев П.Н., Голубев В.И., Исаев В.И., Киселева Е.А., Михайлов В.О., Смольянинова Е.И. Некоторые проблемы обработки и интерпретации данных спутниковой радарной интерферометрии на примере мониторинга оползневых процессов / Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.- 2012, Том 9.- № 2.- С.130-142.
7. Железнов М.М., Василейский А.С., Макаров И.Ю. Мониторинг потенциально опасных воздействий на железнодорожную инфраструктуру с использованием космических систем ДЗЗ // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта.- 2010, № 6.- С.16-19.
8. Инженерные изыскания для строительства: практика и опыт Мосгоргеотреста / Гл. ред. Антипов А.В., Осипов В.И.- М.: ООО Издательство «Прспект», 2012.- 352 с.

9. Кантемиров Ю.И., Баранов Ю.Б., Киселевский Е.В., Билянский В.В., Вергелес С.П., Никифоров С.Э., Грязнов В.Г., Болсуновский М.А. Опыт комплексного мониторинга смещений земной поверхности на разрабатываемых месторождениях углеводородов с помощью геодезических и космических методов // Геоматика.- 2009, № 1 (2).- С.71-74.
10. Мансуров В.А., Сатов М.Ж., Жантуев Р.Т., Кантемиров Ю.И. Космический радарный мониторинг смещений земной поверхности и сооружений на Жезказганском месторождении меди (Республика Казахстан) // Геоматика.- 2012, № 1 (14).- С.77-83.
11. Costantini M., Falco S., Malvarosa F., Minati F. A new method for identification and analysis of persistent scatterers in series of SAR images / Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS-2008), Boston MA, USA, 7-11 July 2008.- IEEE International, 2008.- P.449-452.
12. Costantini M., Trillo F., Vecchioli F., Vasileisky A. Ground deformations monitoring by persistent scatterer pairs (PSP) SAR interferometry / Сборник тезисов 8-й Всероссийской открытой конференции «Земля из космоса - наиболее эффективные решения», Москва 14-19 ноября 2010 г.- М.: ИКИ РАН.- С.243-244.
13. Kiseleva E., Mikhailov V., Smolyaninova E., Dmitriev P., Golubev V., Timoshkina E., Hooper A., Samiei-Esfahany S., Hanssen R. PS-InSAR monitoring of landslide activity in Black Sea coast of the Caucasus // Procedia Technology.- 2014, Vol.16.- P.404-413.

Карацуба Е.А., ВЦ РАН, г. Москва

Адуенко А.А., Рейер И.А., Кузнецов М.П., Стрижов В.В., МФТИ, г. Москва

Мониторинг состояния железнодорожных объектов и инженерных сооружений по спутниковым снимкам

Введение

Одной из важнейших задач обеспечения безопасности железнодорожных перевозок является выявление смещений объектов земной поверхности [1, 2]. Такими объектами являются, например, объекты железнодорожной инфраструктуры, здания и сооружения. Для выявления смещений объектов используются наземные и спутниковые методы. Среди спутниковых методов выделяют методы РСА-интерферометрии [3], с помощью которых появляется возможность замечать малейшие (до нескольких миллиметров) смещения объектов земной поверхности.

Радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА) позволяют получать детальные изображения земной поверхности. Высокое разрешения снимков достигается путем искусственного увеличения эффективного размера бортовой антенны спутника при его орбитальном движении.

Принцип РСА-интерферометрии заключается в следующем [3, 4]. Каждый пиксел спутникового снимка содержит информацию о действительной и мнимой части волны, отраженной от участка земной поверхности и принятой спутником. Таким образом, спутниковый снимок имеет две составляющие: действительную

и мнимую часть, которые могут быть преобразованы в амплитудную (яркостную) и фазовую составляющие изображения. Отметим, что типичный размер участка земной поверхности в одном пикселе изображения превышает квадратный метр, что делает невозможным определение миллиметровых смещений по яркостной составляющей изображения. Для этой цели используется анализ фазовых составляющих набора снимков.

Располагая набором фазовых составляющих РСА, полученных спутником в разные моменты времени с периодичностью, например, один снимок в сутки, рассчитывается изменение фазовой составляющей с течением времени. Изменение фазовой составляющей связано линейной зависимостью с разностью хода волны, отраженной от поверхности и, таким образом, появляется возможность измерять вертикальные смещения объектов земной поверхности, сравнимые с длиной волны сигнала спутника, имеющей порядок нескольких сантиметров.

Основная трудность такого подхода заключается в том, что измерения фазовой составляющей зашумлены многими факторами, связанными с различным относительным положением спутника, атмосферными эффек-

тами и диэлектрической проницаемостью среды, от которой происходит отражение волны. Для устранения этих проблем было предложено понятие устойчивых отражателей. Устойчивым отражателем называется такой участок земной поверхности, для которого фазовая характеристика отраженной волны меняется незначительно с течением времени. Было предложено измерять изменение фазы и, соответственно, разности хода для разреженного множества устойчивых отражателей на серии РСА-изображений и выявлять малейшие смещения земной поверхности именно для этого разреженного множества.

Таким образом, метод определения смещений объектов земной поверхности, разрабатываемый в данной работе, состоит из следующих этапов. На первом этапе выполняется процедура совмещения РСА-изображений [5, 6], полученных в разные моменты времени. Для каждого РСА-изображения выделяется система устойчивых отражателей [7, 8]. Составляется единая система отражателей для серии спутниковых изображений [9, 10]. Рассчитывается изменение фазового сдвига для серии изображений. Выделяются пары отражателей с наименьшим относительным изменением фазы. По относительному изменению фазы рассчитывается относительное изменение высоты земной поверхности [11, 12].

Помимо стандартного метода устойчивых отражателей, в работе рассматривается метод пар устойчивых отражателей [13]. Метод пар устойчивых отражателей считается более устойчивым, чем стандартный метод устойчивых отражателей, поскольку использует связи между близко расположенными точками. Такой подход позволяет учесть схожесть характера влияния атмосферы на фазовую составляющую сигнала в соседних точках. Метод пар устойчивых отражателей также позволяет учесть частичную когерентность разных точек изображения. В силу этого, большая по сравнению со стандартным методом устойчивых отражателей часть снимка оказывается покрыта точками, скорость которых вдоль направления наблюдения известна. Однако в некоторых случаях недостатком метода пар устойчивых отражателей можно считать большую гладкость полученного решения по сравнению со стандартным методом устойчивых отражателей.

После определения параметров модели из шума в фазе выделяется атмосферная составляющая, с помощью которой определяются особенности погоды на территории в момент съемки.

Для иллюстративного примера используется 35 SAR-снимков территории размеров 5×5 км [11].

Детектор Харриса для выявления особых точек на изображении.

Для определения относительного смещения изображений выделим на каждом изображении особые точки и проведем их сопоставление.

Под особыми точками будем понимать точки, для которых велико значение меры Харриса [5]. К таковым будут относиться угловые точки. Путем сопоставления этих точек и будем определять смещение изображения.

На рис.1 показан пример сопоставления точек снимков и определения сдвига с помощью амплитудных составляющих сигнала.

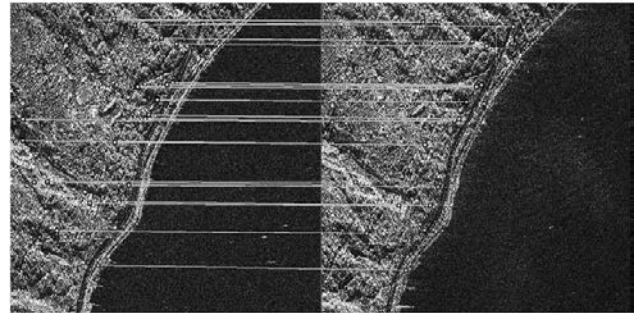


Рис. 1. Совмещение изображений

Постановка задачи выделения устойчивых отражателей

Заданы $K+1$ изображений --- матриц размера $m \times n$ яркостей Z , высот H и фаз Φ . Элементы $z_{ij} \in \mathbb{R}_+$, $h_{ij} \in \mathbb{R}$, $\phi_{ij} \in [-\pi, \pi]$. Требуется построить отображение $g: (i, j) \in [1, \dots, m] \times [1, \dots, m] \rightarrow \{0, 1\}$, где 1 соответствует устойчивому отражателю, а 0 — остальным точкам.

Определение параметров орбиты спутника

Основным принципом SAR-интерферометрии является регистрация нескольких снимков одной местности в разные моменты времени с немного отличающихся орбит. Пусть среди $K+1$ снимка снимок с номером M выбран опорным. Для дальнейшей работы со снимками необходимо определить следующие параметры орбит спутников, соответствующих каждому из оставшихся снимков: временная база T_i по отношению к положению радара, соответствующему снимку с номером M , и пространственная база радара B_i , перпендикулярная направлению наблюдения. Под временной базой радара понимается время прошедшее между двумя снимками, а потому $T_i = t_i - t_M$, где t_i — время, когда был сделан i снимок. Пространственную же базу радара будем рассчитывать как среднее расстояние между плоскостями орбит спутников при пролете на территории. Среднее расстояние необходимо ввести из-за отсутствия строгой параллельности орбитальных плоскостей в силу неточностей позиционирования спутников. При этом знак B_i определяется следующим образом: B_i считаем положительной, если i положение спутника в среднем дальше от регистрируемой сцены, чем M .

Модель фазовой составляющей сигнала

Фаза отраженного сигнала определяется расстоянием от точки местности, сигнал от которой регистри-

руется, до спутника. Разность же фаз, зарегистрированных от одной точки, в разные моменты времени с несколько отличающихся орбит зависит от изменения высоты h точки над уровнем моря, относительного смещения d вдоль направления наблюдения и от положения точки на регистрируемой сцене, выражаемого расстоянием s .

С учетом введенного определения временной и пространственной базы радара, перпендикулярной направлению наблюдения, имеем следующую модель для фазовой составляющей сигнала

$$\Phi_i - \Phi_M = \frac{4\pi B_i}{\lambda R \sin \theta} \mathbf{H} + \frac{4\pi B_i}{\lambda R \tan \theta} \mathbf{S} + \frac{4\pi}{\lambda} \mathbf{V} T_i + \Delta\Phi_i^{\text{atm}} + \Delta\Phi_i^{\text{noi}}, \quad (1)$$

где Φ_i^{atm} – отклонения фазы, связанные с атмосферными явлениями, а $\Delta\Phi_i^{\text{noi}}$ – шумовая составляющая, \mathbf{S} – матрица расстояний от точек местности до спутника, \mathbf{V} – матрица скоростей движения местности вдоль направления наблюдения, \mathbf{H} – матрица высот для снимаемой местности, R – среднее расстояние от спутника до сцены, $R = \mathbf{H} / \cos \theta$.

Временная когерентность точек снимков

В соответствии с (1) произведем вычитание из фазы каждого снимка составляющей, связанной с рельефом местности \mathbf{H} и положением спутника, определяющем \mathbf{S} . Сохраним для получившихся матриц обозначение Φ_i . Получим следующую модель для фазовой составляющей сигнала.

$$\Phi_i^{\text{rel}} = \Phi_i - \Phi_M = \frac{4\pi B_i}{\lambda R \sin \theta} \Delta\mathbf{H} + \frac{4\pi}{\lambda} \mathbf{V} T_i + \Delta\Phi_i^{\text{atm}} + \Delta\Phi_i^{\text{noi}}. \quad (2)$$

В (2) присутствует матрица $\Delta\mathbf{H}$, так как цифровая модель рельефа \mathbf{H} часто обладает заметно меньшим разрешением, чем снимки местности, с характеристической ошибкой порядка 10 метров. Матрица $\Delta\mathbf{H}$ соответствует этим неточностям.

Рассмотрим произвольную точку снимка с координатами (i, k) . Предположим, что ее скорость вдоль направления наблюдения v_{ik} и ошибка в высоте Δh_{ik} определены. Тогда временной когерентностью для этой точки будет

$$c_{ik} = \left| \frac{\sum_{q \neq M} \exp \left[j \left(\phi_q^{ik} - 4\pi v_{ik} T_q / \lambda - 4\pi B_q \Delta h_{ik} / (\lambda R \sin \theta) \right) \right]}{K} \right|. \quad (3)$$

Из формулы (3) заключаем, что $0 \leq c_{ij} \leq 1$, причем $c_{ij} = 1$ тогда и только тогда, когда фаза сигнала полностью объясняется линейным движением вдоль направления наблюдения и найденной ошибкой в определении высоты.

Алгоритм выделения устойчивых отражателей.

Пусть $\bar{\mathbf{Z}}$ есть осредненное изображение, то есть

$$\bar{\mathbf{Z}} = \frac{1}{K+1} \sum_{q=1}^{K+1} \mathbf{Z}_q / \bar{\mathbf{Z}}_q.$$

Для каждой точки снимков считаем оценку дисперсии амплитуды

$$\mathbf{D} = \frac{1}{K} \sum_{q=1}^{K+1} \left[\left(\mathbf{Z}_q / \bar{\mathbf{Z}}_q - \bar{\mathbf{Z}} \right) \times \left(\mathbf{Z}_q / \bar{\mathbf{Z}}_q - \bar{\mathbf{Z}} \right) \right],$$

где \times означает поэлементное умножение. Установим две границы $\gamma_1 \geq 1$ и $\gamma_2 > 0$. Точку (i, k) будем считать устойчивым отражателем, если

$$\bar{z}_{ik} \geq \gamma_1 \text{ и } \frac{\sqrt{d_{ik}}}{\bar{z}_{ik}} \leq \gamma_2.$$

Количество выделенных устойчивых отражателей снижается при увеличении γ_1 и уменьшении γ_2 . При известных матрицах \mathbf{V} и $\Delta\mathbf{H}$ при одинаковом количестве выделенных устойчивых отражателей описанные методы будем сравнивать по средней когерентности #9) этих отражателей. Описанный метод будем использовать для нахождения кандидатов в устойчивые отражатели. Опишем далее метод оценки матриц \mathbf{V} и $\Delta\mathbf{H}$.

Метод устойчивых отражателей для оценки скоростей движения точек и ошибок в высотах

Будем оценивать матрицы \mathbf{V} и $\Delta\mathbf{H}$ поэлементно, без учета зависимостей между точками снимков. Это соответствует стандартному методу устойчивых отражателей. Для точки (i, k) снимков величины v_{ik} и Δh_{ik} найдем из задачи максимизации временной когерентности (3) для этой точки

$$[v_{ik}, \Delta h_{ik}] = \text{argmax } c_{ik}(v_{ik}, \Delta h_{ik}).$$

Точку (i, k) считаем устойчивым отражателем, если $c_{ik} \geq \beta_1$.

Метод пар устойчивых отражателей для оценки скоростей движения точек и ошибок в высотах без развертки фазы

Метод пар устойчивых отражателей основан на анализе пар близких точек, являющихся кандидатами в устойчивые отражатели. За счет близости точек удается уменьшить влияние атмосферной составляющей фазы, так как для близких точек это влияние почти совпадает. В силу этого можно получить больше точек, так как метод позволяет учесть и их частичную когерентность.

На рис. 2 показаны относительные скорости движения отражателей, полученные методом устойчивых отражателей (слева) и методом пар устойчивых отражателей (справа).

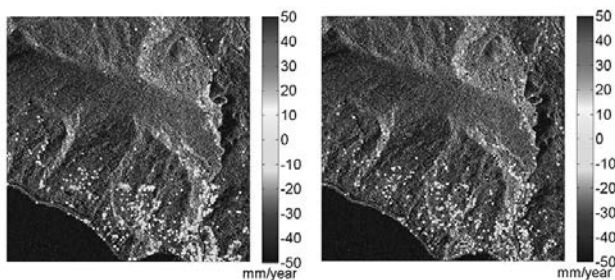


Рис. 2. Относительные скорости движения отражателей

Восстановление абсолютных значений скоростей устойчивых отражателей вдоль направления движения и погрешностей цифровой модели рельефа по графу устойчивых отражателей.

Для восстановления абсолютных значений скоростей устойчивых отражателей вдоль направления движения и погрешностей цифровой модели рельефа по графу устойчивых отражателей воспользуемся методом наименьших квадратов. Опишем, как определить абсолютные скорости движения отражателей. Определение абсолютных погрешностей цифровой модели рельефа полностью аналогично. Имеем наблюдаемый вектор y размера $|E_j|$ относительных скоростей устойчивых отражателей. Искомым вектором параметров w размера $|P_j|$ является вектор абсолютных скоростей. Добавим еще условие, что в среднем территория не движется (иначе скорости определимы с точностью до константы). Тогда модель приобретает вид

$$\begin{pmatrix} 0 \\ y \end{pmatrix} = Xw + \varepsilon,$$

где первая строка X состоит из единиц и соответствует условию того, что территория в целом не движется. В последующих строках X для каждого ребра $a \in E_p$, соединяющего точки p_1 и p_2 , содержится 1 в столбце, соответствующем p_1 , и -1 в столбце, соответствующем p_2 .

Вычислительный эксперимент

Результаты для скоростей движения устойчивых отражателей и ошибок в цифровой модели рельефа приведены на рис. 3. Для обоих методов ошибка в цифровой модели рельефа имеет среднее 0,0 м и стандартное отклонение 4,4 м. Однако метод пар устойчивых отражателей дает более гладкие результаты для скорости движения устойчивых отражателей. Этот метод позволяет указать на некоторые объекты, которые испытывают сильный подъем или сильное проседание. Например, проседание порядка 20 мм/год испытывают несколько пирсов. В целом же лишь для небольшой доли точек характерна значительная скорость движения или ошибка в высоте.

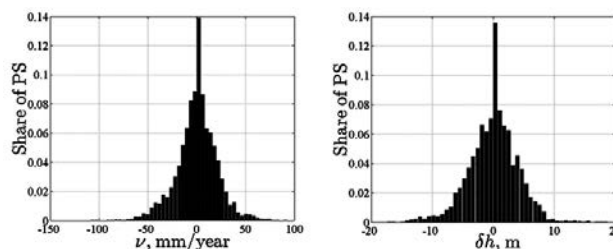


Рис. 3. Гистограммы распределений скоростей и ошибок в высоте

Заключение

В данной работе была проведена реконструкция двух методов определения скоростей движения точек местности и погрешностей цифровой модели рельефа. Первый из методов, метод устойчивых отражателей, позволяет определить скорости движения меньшего числа точек. Было установлено, что метод требует развертки фазы, поскольку результаты, полученные с его помощью без развертки фазы, заметно отличаются от результатов метода пар устойчивых отражателей, который считается более устойчивым. Предложенная модификация метода пар устойчивых отражателей позволила выделить точки, в которых наблюдается сильное проседание или подъем грунта (порядка 20 мм/год). Метод пар устойчивых отражателей без развертки фазы оказался применимым для определения скоростей движения точек местности вдоль направления наблюдения и погрешностей в цифровой модели рельефа. Для рассматривавшейся территории ошибка по высоте в цифровой модели рельефа составила 10 м для обоих алгоритмов, а средняя скорость движения для метода устойчивых отражателей составила 0.3 мм/год.

Литература

1. Васильевский А. С., Карацуба Е. А., Карелов А. И., Кузнецов М. П., Рейер И. А. Алгоритм выделения устойчивых отражателей на спутниковых радиолокационных снимках земной поверхности // Машинное обучение и анализ данных, 2012. № 4. С. 473–484.
2. Васильевский А. С., Карацуба Е. А., Карелов А. И., Кузнецов М. П., Рейер И. А. Обнаружение движения устойчивых отражателей по серии спутниковых радиолокационных снимков земной поверхности // Машинное обучение и анализ данных, 2013. № 5. С. 489–504.
3. Bamler R., Hartl P. Synthetic aperture radar interferometry // Inverse problems, 1998. Vol. 14. No. 4. Pp. 1–54.
4. Hetland E. A. et al. Multiscale InSAR time series (MInTS) analysis of surface deformation // Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012), 2012. Vol. 117. No. B2.
5. Harris C., Stephens M. A combined corner and edge detector // Alvey vision conference, 1988. Vol. 15. Pp. 147–151.

6. Lowe D. Distinctive image features from scale invariant keypoints // *IJCV*, 2004. Vol. 60. No. 2. Pp. 91–110.
7. Muja M., Lowe D. G. Fast Approximate Nearest Neighbors with Automatic Algorithm Configuration // *VISAPP* (1), 2009. Pp. 331–340.
8. Ferretti A., Prati C., Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry // *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 2001. Vol.39. No.1. Pp.8–20.
9. Ferretti A., Prati C., Rocca F. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry // *Geoscience and Remote Sensing, IEEE transactions on*, 2000. Vol. 38. No. 5. Pp. 2202–2212.
10. Prati C., Ferretti A., Perissin D. Recent advances on surface ground deformation measurement by means of repeated space-borne SAR observations // *Journal of Geodynamics*, 2010. Vol. 49. No. 3. Pp. 161–170.
11. Nitti D. O. et al. On the use of COSMO/SkyMed data and Weather Models for interferometric DEM generation // *European Journal of Remote Sensing*, 2013. Vol. 46. Pp. 250–271.
12. Balzter H., Rowland C. S., Saich P. Forest canopy height and carbon estimation at Monks Wood National Nature Reserve, UK, using dual-wavelength SAR interferometry // *Remote Sensing of Environment*, 2007. Vol. 108. No. 3. Pp. 224–239.
13. Costantini M. et al. A new method for identification and analysis of persistent scatterers in series of SAR images // *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2008. Vol. 2. Pp. 449–452.

Вакуленко С.П., Ларин О.Н., Шарапов Д.К., МГУПС (МИИТ), г. Москва

Использование технологий радиочастотной идентификации в системах доставки грузов

Создание логистической инфраструктуры на качественно новом уровне связано с необходимостью совершенствования интеграционных процессов с использованием технологий интеллектуальных транспортных систем, включая системы автоматической идентификации. Современная система радиочастотной идентификации объектов – RFID (англ. *Radio Frequency IDentification*) имеет преимущества перед другими системами, так как обеспечивается возможность оперативного и достоверного учёта любой отдельно взятой грузовой единицы (товара), существенно упрощается процесс сбора и обработки информации об операциях с грузами, практически полностью исключается влияние человеческого фактора на результаты идентификации объектов.

На сегодняшний день использование RFID технологий в логистике ограничивается только задачами идентификации материальных объектов (товаров, грузов), как правило, для целей складского учёта. Что не позволяет говорить о полной реализации потенциальных возможностей технических средств и технологий радиочастотной идентификации. Решение данной задачи невозможно без модернизации материально-технической и технологической базы предприятий, использования современной техники и информационных технологий при осуществлении большинства

логистических операций. Средства и технологии RFID должны использоваться не только для идентификации товарной продукции, но ими должны оснащаться технологическое оборудование, транспортные средства, грузовое оборудование и прочие объекты, участвующие в процессе доставки грузов на всем протяжении логистических цепей. Однако получить реальный практический эффект от использования всеобъемлющего объема информации о работе транспортно-логистических систем с целью оптимизации их деятельности можно будет только при наличии системы управления процессами доставки грузов различными видами транспорта, действующей на основе адекватных методов и алгоритмов обработки RFID-данных.

Для реализации указанного решения требуется разработка принципиально новой методологии построения системы управления транспортно-логистическими процессами доставки грузов на основе всеобъемлющих данных о происходящих процессах. Процесс получения фактических данных становится управляемым и независимым от наблюдаемых объектов, не требуется формирование отчетности на нижних уровнях иерархии. На уровне глобальной цепи поставок будет создана система оперативного регулирования логистических процессов осуществления доставки грузов на основе полной исчерпывающей

информации о состоянии объектов и процессов в режиме реального времени.

Интеграции технологий радиочастотной идентификации с логистическими процессами доставки грузов обеспечит сбор и интеграцию первичных данных о состоянии и результативности работы транспортно-логистических систем доставки грузов с распределенных устройств и датчиков, непосредственно отражающих процесс выполнения логистических операций.

Интеграции технологий радиочастотной идентификации с логистическими процессами доставки грузов обеспечивает повышение эффективности работы транспортно-логистических систем за счёт получения достоверной и актуальной информации о функционировании транспортно-логистических систем доставки грузов; сокращения времени нахождения товаров в цепи поставок производителя до конечного потребителя; повышения сохранности грузов в процессе их доставки по всем участкам логистической цепи; повышение эффективности бизнеса за счёт повышения

прозрачности бизнес-процессов, гибкости управления ими, своевременного реагирования на отклонения параметров доставки грузов; обеспечение оперативности и достоверности планирования параметров доставки грузов и всех видов ресурсов на её выполнение; оперативности и полноты контроля всех структур сложного объекта на основе непосредственного отображения рабочих данных и своевременного реагирования на возможные отклонения и вызовы; ликвидации потерь в звеньях цепей поставок в связи нарушениями сроков и комплектности партий поставок; сокращения логистических издержек в конечной цене товаров; повышения доступности товаров народного потребления для населения страны; обеспечения конкурентоспособности отечественной продукции на национальном и международном рынках; повышения эффективности управления транспортно-логистическими процессами на всех этапах жизненного цикла товаров; снижения рисков экономических потерь и расходов на контроль процессов доставки грузов.

Розенберг И.Н., ОАО «НИИАС», Москва
 Беляков С.Л., Южный Федеральный Университет, Таганрог

Методы и средства образного представления знаний для принятия решений с использованием геоинформационных систем

Геоинформационные системы (ГИС) являются одним из мощных инструментов поддержки принятия решений [1]. Многие трудно формализуемые задачи планирования и управления решаются путем геоинформационного моделирования реального мира. Задача принятия решения с помощью ГИС реализуется следующим образом. Пользователь, решая проблему, создает картографическое изображение ситуации S , для которой ГИС строит решение $D=R(S)$, где R - процедура, основанная на знаниях. Процедуру R реализует интеллектуальный компонент ГИС. Если $U(D)$ - критерий качества решения, то формально принятие наилучшего решения описывается как

$$\begin{cases} U(D) \rightarrow \max, \\ D = R(S). \end{cases}$$

Достоверность является одним из наиболее важных критериев качества решений, формируемых с помощью ГИС. Достоверность понимается как соответствие решения действительности, возможность реализовать решение в указанных пространственных и временных рамках. Ценность такого решения максимальна. Трудность получения качественных решений – в объективном расхождении состояния реального мира и его геоинформационной модели. Действительность непрерывно изменяется, что ведет к появлению неоправданных обобщений и игнорирование существенных деталей в результате работы процедуры $R(S)$.

В докладе рассматривается концептуальная модель опыта принятия решений, основанная на описании наблюдаемых ситуаций и решений с позиции их преобразований. Интерес к подобной модели вызван возможностью существенного повышения достоверности принятия решений на основе опыта.

Достоверность решений, полученных геоинформационным моделированием, зависит от следующих факторов:

- актуальности картографической основы;
- точности и полноты описания проблемной ситуации;
- наполнения базы знаний ГИС прецедентами из проблемной области;
- точности и полноты описания альтернативных решений и оценок последствий их использования.



Рис. 1. Пример реализации решения в логистическом проекте

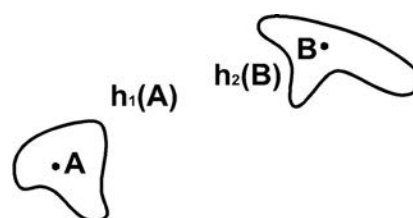


Рис. 2. Образ ситуации прецедента

Возможны различные пути повышения достоверности, каждый из которых особым образом компенсирует влияние одного или нескольких факторов. Анализируя перечисленные подходы, можно заключить, что

- достоверность не может быть обеспечена исключительно оперативным картографированием не только из-за трудности его автоматизации, но и из-за неправдоподобия сравнения прецедентов. Описание прецедентов носит статичный, атомарный характер и не позволяет оценить влияние изменений на ситуацию;
- достоверность предлагаемых решений повышается при оперативном картографировании, однако, требуется модель генерации возможных решений, учитывающая возможные изменения реального мира;
- уровень достоверности может быть существенно повышен, если модифицировать известную процедуру прецедентного анализа, декомпозировав единую картину мира и используя вместо атомарных прецедентов их инварианты в ограниченных областях пространства и времени.

В работе [4] была предложен принцип образного описания опыта в ГИС. Отличительной особенностью принципа является описание ситуаций и решений как

совокупности их преобразований, при которых не меняется суть прецедентов. Рассмотрим особенности реализации прецедентного анализа в этом случае.

Традиционно прецедентный анализ базируется на нахождении близких по смыслу ситуаций. Прецеденты p_1 и p_2 считаются близкими, если в соответствии с принятой метрикой $N(p_1, p_2)$ расстояние между ними $N(p_1, p_2) > n$, где n - заданное значение. Метрика зависит от признаков, однозначно характеризующих любой прецедент.

Концептуальная модель образа прецедента $I_p = \langle I_s, I_d \rangle$ имеет две существенные особенности:

- образ прецедента включает в себя набор допустимых преобразований ситуации I_s , не меняющих суть этой ситуации и принятого в ней решения. Образ описывает семейство ситуаций, похожих на наблюдавшуюся единичную ситуацию. Преобразования конкретной ситуации всегда содержат обобщение, хотя и локализируются пространственными, временными и семантическими рамками наблюдаемого. Можно утверждать, что именно по этой причине в образ прецедента закладывается фрагмент «картины мира», которая столь существенна для получения достоверного решения;
- образ прецедента несет в себе набор допустимых преобразований решения I_d , сохраняющих его сущность. Образ решения задает семейство решений, каждое из которых применимо в одинаковых по сути ситуациях I_s . Такой подход генерирует достоверное «разумное» решение, поскольку является результатом дедуктивного заключения.

Чтобы оценивать близость образов, воспользуемся принципами когнитивной семантики [5]. Представим внутреннюю структуру образа ситуации как $I_s = \langle c, H(c) \rangle$, где c - центр образа, $H(c) = \{h_1(c), h_2(c), \dots, h_M(c)\}$ - набор его преобразований. Под центром понимается та реальная ситуация, которая послужила основой возникновения образа. Рассмотрим модель образа на примере (рис. 1). Пусть требуется перевезти груз из точки A в точку B и этот логистический проект был реализован по траектории AB . Данный прецедент порождает следующий образ (рис. 2):

- $h_1(A)$ является преобразованием положения точки A , т.е. областью возможного местонахождения транспортного средства, при котором выбранная траектория AB существенно не меняется;
- $h_2(B)$ есть преобразование точки B . Любое положение целевой точки в данной области не меняет суть ситуации и решения.

Центром образа I_s является пара точек A и B , преобразования отображаются зонами $h_1(A)$ и $h_2(B)$. На рис. 3 показан образ решения. В него включен центр - траектория AB - и возможные преобразования траектории $g_i(AB)$, $i = 0, 3$. Преобразования показаны пунктиром.

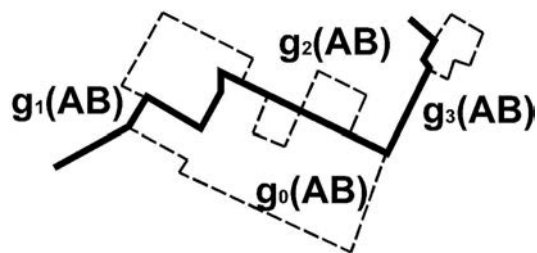


Рис. 3. Образ решения прецедента

Образное мышление рассматривается как сопоставление образов [5]. Техническая реализация этой операции требует определение метрики. Метрика расстояния между образами $N(I_1, I_2)$ должна строиться так, чтобы учесть субъективизм знаний экспертов. Субъективизм проявляется, с одной стороны, в индивидуальной интерпретации реализовавшейся ситуации (центра образа), с другой - в суждении о прогнозируемых модификациях уже наблюдавшейся ситуации.

На вид метрики $N(I_1, I_2)$, как показал анализ, влияют следующие факторы:

- взаимное положение границ областей преобразований и их центров;
- степень перекрытия областей преобразований.

Учитывать первый фактор предлагается применением процедуры классификации. На рис. 4 приведены диаграммы взаимного расположения пары образов. Овалы обозначают области преобразований, точки внутри овалов - центры образов. Через N_i ($i = 0, 5$) обозначены классы топологических отношений, возникающих при сравнении. Анализ практических случаев показал, что на субъективное заключение о близости ситуаций существенно влияет расположение центров образов относительно пересечения областей преобразований. Расстояние между центрами роли не играет. Существенно то, в каком регионе пересечения эти центры размещены. Класс N_0 соответствует сравнению образов, не имеющих общих вариантов преобразований. Класс N_1 - наличие общих преобразований, которые не подтверждены практикой, т.е. в них не попадает ни один из центров. Класс N_5 включает ситуацию, в которой преобразования одного из образов полностью включаются в преобразования другого, причем это подтверждено опытом: центры образов размещены в зоне пересечения. Следует заключить, что предпочтения при выборе ближайшего образа к заданному будут описываться выражением

$$N_0 < N_1 < N_2 < N_3 < N_4 < N_5$$

Таким образом, предложенная классификация топологических отношений позволяет реализовать «разумную» процедуру оценки близости.

Наличие областей пересечения при анализе преобразований говорит о том, что имеется некоторая общность возможных изменений ситуаций. Оценить степень общности преобразований h_i двух образов I_1 и I_2 предлагается выражением

$$\alpha = \frac{2S(h_i^{(I_1)} \cap h_i^{(I_2)})}{S(h_i^{(I_1)}) + S(h_i^{(I_2)})},$$

где $S(x)$ есть площадь области x . Значение $\alpha=1$ имеет место в случае полного совпадения возможных преобразований, $\alpha=0$ в противном случае.

Пример сравнения ситуаций для рассматриваемой выше задачи показан на рис. 5. Сравняется близость образа I_1 для пары точек AB с образами I_2 для пары точек CD и I_3 для пары точек EF . Образ I_1 оказывается более близким к образу I_3 несмотря на то, центры A и C расположены ближе и степень общности $\alpha_{12} > \alpha_{13}$, поскольку I_1 и I_3 имеют более предпочтительное топологическое размещение.

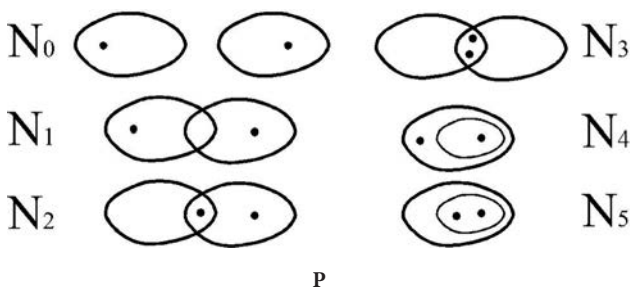


рис. 4. Классы взаимного положения образов

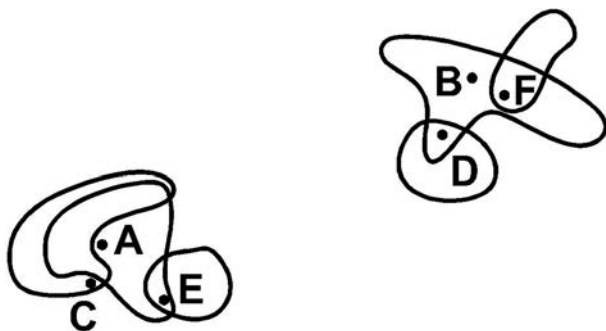


Рис. 5. Пример сравнения ситуаций

Таким образом, предложенные механизмы оценки близости по отдельно взятым преобразованиям позволяют учитывать специфику субъективного сопоставления образов. Поскольку каждый образ описывается несколькими преобразованиями, возникает задача многокритериального выбора. Ее решение может быть найдено известными способами [6], однако, с целью повышения достоверности сравнения целесообразно использовать образное представление.

Определение наиболее близкого образа заданному образу можно рассматривать как принятие решения в условиях неопределенности. Формальные выражения для метрики не отражают существующие на практике зависимости от времени и места событий. Например, решения о мерах по ликвидации последствий урагана могут приниматься с предпочтением того, что «произошло недавно», но не «того, что было в этом месте гораздо раньше». Предпочтение выбора в данном случае обусловлено опытом лица, принимающего решение, и этот опыт, возможно, указывает на более высокую значимость того, что «произошло недавно» ввиду существенных изменений инфраструктуры анализируемого участка местности.

Возможность картографировать образы оценивания близости прецедентов дает несомненный эффект повышения достоверности. Реализацию образа покажем на примере. В таблице приведены данные о сравнении близости образа I_1 к образам I_2 и I_3 . Через S_{mn} обозначены площади областей пересечения преобразований, относящихся к определенному слою карты. В примере таких слоев 3. Через \hat{N}_{mn} обозначен номер класса взаимного положения образов. Приведенные данные служат исходным для принятия решения. Заметим, что информация о предпочтениях явно не указана, но содержится в конечном результате.

Слой карты	S_{12}	S_{13}	\hat{N}_{12}	\hat{N}_{13}
Географическая основа (ГО)	0,1	0,15	1	3
Транспортные магистрали (ТМ)	0,6	0,3	2	3
Транспортная инфраструктура (ТИ)	0,5	0,8	5	1

Образ, как определялось выше, включает центр и его преобразования. Визуализация образа для примера показана на рис. 6 и 7. Центр образа отображается точками, преобразования – столбцами. Высота и положение столбцов отображают знание эксперта о возможных преобразованиях, не влияющих на предпочтение выбора. Визуализация пространственной и временной компоненты образа показаны на рис. 8 и 9. Пространственная граница (рис. 8) задает область применимости образа. В области точками показаны сравнивавшиеся ранее прецеденты. Они образуют центр образа. Центром образа на временной диаграмме (рис. 9) является момент сравнения. Следующие далее интервалы в виде горизонтальных прямоугольников ограничивают применимость образа.

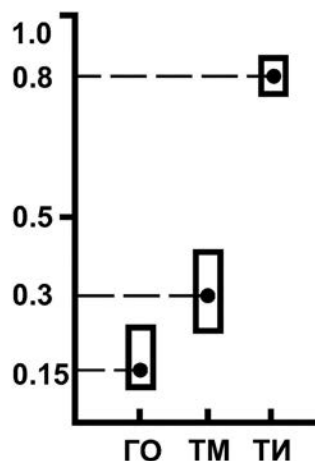


Рис. 6. Визуализация образа степени пересечения преобразований

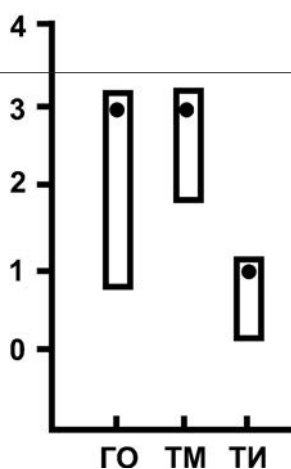


Рис. 7. Визуализация образа принадлежности классам взаимного положения

Подчеркнем важность визуализации в описании образа [7]. Возможные преобразования центров образов должны отображаться адекватно профессиональным навыкам эксперта в использовании карт, схем и планов. Способ отображения оказывает влияние на качество получаемых от эксперта знаний и, соответственно, на достоверность принимаемых впоследствии решений.

Анализируя эффективность образного представления, необходимо отметить следующее.



Рис. 8. Визуализация пространственной компоненты образа



Рис. 9. Визуализация временной компоненты образа

Описание опыта образами существенно богаче традиционно используемых картографических описаний. Отображение преобразований возникает как результат субъективного анализа, в котором использовались глубинные знания эксперта. Этот анализ интегрирует гипотезы, обобщения и прогнозы, воспроизвести которые невозможно формально. При этом становится возможным зафиксировать конечный результат анализа инструментами картографической визуализации. Пространственная, временная и семантическая привязка преобразований создают целостную смысловую картину каждой ситуации и принятых в ней решений. Таким образом, картографические образы опыта открывают новую возможность создавать, хранить и обмениваться сложными смысловыми концепциями.

Литература

1. Иванников А.Л., Кулагин В.П., Тихонов А.Н., Цветков В.Я. Геоинформатика. – М: Макс пресс, 2001. 349 с.
2. Вагин В.Н., Головина Е.Ю., Загорянская А.А., Фомина М.В. Достоверный и правдоподобный вывод в интеллектуальных системах. – 2е изд., испр. и доп. / Под ред. Вагина В.Н. и Поспелова Д.А. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008.
3. П.Р. Варшавский, А.П. Еремеев Моделирование рассуждений на основе прецедентов в интеллектуальных системах поддержки принятия решений // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2009, №1. – С. 45–57.
4. Беляков С.Л., Белякова М.Л., Савельева М.Н. Прецедентный анализ образов в интеллектуальных геоинформационных системах // Информационные технологии. – 2013, №7. – С. 22–25.
5. Кузнецов О.П. О концептуальной семантике // Искусственный интеллект и принятие решений. - 2012, № 4. – С. 32–42.
6. А.Б. Петровский Теория принятия решений. М.: Издательский центр «Академия, 2009
7. Belyakov S.L., Bozhenyuk A.V., Belykova M.L., Rozenberg I.N. Model Of Intellectual Visualization Of Geoinformation Service // Proc. 28th European Conference on Modelling and Simulation ECMS 2014. – 2014. – P.326–333.

СЕКЦИЯ №4

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СЛОЖНЫХ СИСТЕМАХ. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТЬЮ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Розенберг Е.Н., ОАО «НИИАС», г. Москва

Интеллектуальная поддержка решения задач ИСУЖТ средствами железнодорожной автоматики нижнего уровня

Эффективность функционирования ИСУЖТ в целом зависит от объема и достоверности поступающей информации от подсистем нижнего уровня, а также скорости ее передачи и полноты ее использования для решения задач централизованного автоматического и автоматизированного управления стационарными и подвижными системами.

В ОАО «НИИАС» разработаны принципы многоуровневого обеспечения безопасности систем автоматизированного управления технологическими процессами (АСУТП), входящими в ИСУЖТ, позволяющие повысить защищенность этих систем от рисков. В основе реализации этой идеологии лежит использование многоуровневой архитектуры АСУТП.

Многоуровневая система предназначена для достижения требуемых показателей пропускной способности участков железных дорог и гарантированной безопасности систем управления в условиях недостаточно высокой функциональной безопасности составных СЖАТ, каналов и сетей оперативно-технологической связи, при незначительных резервах времени, ограниченной эффективности средств диагностики отказов.

Принципы многоуровневого обеспечения безопасности:

1. Принцип многоуровневого обеспечения безопасности каждого автономного аппаратно-программного комплекса (АПК) СЖАТ, входящего в состав ИСУЖТ. В АПК СЖАТ предусматривается выполнение нескольких функций безопасности. Одна или одновременно несколько функций безопасности в

случае возникновения отказа выполняют задачу перевода комплекса (устройства, системы) в неопасное состояние, – это могут быть состояния допустимых пониженных функциональных возможностей или защитные состояния.

При переводе комплекса в состояние защитного отказа производится его восстановление до начального уровня работоспособности и защищенности.

Другой эффект реализации функций – продолжение безопасного функционирования комплекса с допустимыми пониженными функциональными возможностями до возникновения опасного отказа.

2. Принцип формирования многоканальной безопасной многоуровневой системы (МС) из разнотипных устройств или систем. Суть в том, что два или более СЖАТ выполняют на определенном участке дороги аналогичные функции управления, которые реализуются разными способами и алгоритмами. Результаты каждого управления проверяются на непротиворечивость. Если это условие выполняется, то осуществляется управление. В противном случае осуществляется дополнительная проверка и принимается решение о введении защитного отказа одного из устройств или о продолжении его работы в составе МС, но с пониженной производительностью. Уровень функциональной безопасности МС не может быть ниже уровня наиболее безопасного из составных АПК СЖАТ.

3. Принцип выбора более запрещающего сигнала. Суть заключается в том, что в МС вводится устройство

принятия решения, которое реализует следующее правило: если функции управления не противоречивы, но не совпадают по уровням градации опасности управления, то выбирается менее опасное управление.

4. Принцип создания системных функций безопасности в развивающихся МС, входящих в ИСУЖТ.

Развивающаяся многоуровневая система – это МС, которая формирует новые свойства управления и/или новые функции безопасности. В дальнейшем будем рассматривать развивающуюся МС, которая формирует только новые функции безопасности. Суть принципа в следующем: в МС вместе с устройством принятия решения (или вместо него) вводится подсистема поддержки принятия решения (ППР).

Кроме того, для каждой составной АПК СЖАТ вводится дополнительный логический контроль состояний безопасности, который осуществляется путем запоминания, анализа, корреляции с известными логическими последовательностями смены состояний напольного и локомотивного оборудования автоматики и телемеханики.

1. Иерархическая система МС должна состоять из семейства взаимодействующих подсистем. При этом любая подсистема осуществляет преобразование входных данных в выходные в соответствии с детерминированным алгоритмом работы, либо выполняет процедуру принятия решения (в том числе, и при недетерминированном алгоритме работы). Взаимодействие может происходить не только между подсистемами соседних уровней, но и произвольных уровней.
2. Должна обеспечиваться совместимость целей нижестоящих и вышестоящих уровней управления.
3. Должны быть решены проблемы координации взаимодействий ступеней иерархии и нахождения удовлетворительных решений на уровне нижестоящих ступеней.
4. Должно соблюдаться последовательное вертикальное расположение подсистем (ступеней), составляющих систему (вертикальная декомпозиция).
5. Вмешательство уровней происходит только в направлении сверху вниз, при этом эффективность функционирования зависит от работы системы в целом, т.е. от работы каждого из уровней с учетом обратных связей между ними.
6. Должен обеспечиваться приоритет исполнения управляющих воздействий, сформированных к данному моменту времени подсистемами верхнего уровня.
7. Должна существовать зависимость алгоритма работы (действий) подсистем верхнего уровня от фактического выполнения своих функций подсистемами нижнего уровня.

8. Деятельность подсистем любого уровня подвергается воздействию (вмешательству) вышестоящих уровней и, чаще всего, ближайшего старшего уровня, что приводит к изменению алгоритма работы или «алгоритма принятия решений» на нижестоящем уровне.

МС подразделяется на *систему управления движением поездов с обеспечением безопасности* и *систему обеспечения безопасности при многоуровневом контроле*.

Система управления движением поездов строится таким образом, чтобы на каждом уровне управляющий персонал (машинист, дежурный по станции, поездной диспетчер), технические и программные средства обеспечивали:

- контроль за выполнением условий безопасности при ведении поезда и приготовлении маршрутов для пропуска поездов и маневровых передвижений;
- правильность выполнения зависимостей в СЖАТ.



Рис.1. Структурная схема системы управления движением поездов

Структурная схема системы управления безопасностью ИСУЖТ в соответствии с приведенными выше концептуальными положениями приведена на рис. 1.

Уровень 1 (Системы диспетчерского управления).

Решаемые задачи:

- Централизованный (диспетчерский) контроль за выполнением условий безопасности при движении поездов по линии или участку путем ведения гра-

фика исполненного движения, фиксации предельно допустимых отклонений от графика и регулирования интервала по времени между поездами (на входах и выходах станций, в контрольных координатах на перегонах);

- Управление подготовлением маршрутов следования поездов;
- Экстренное прямое управление устройствами 2-го и 3-го уровней при нарушении условий безопасности:
 - принудительная остановка поезда или маневрового состава при нарушении условий безопасности;
 - выработка рекомендаций оперативному персоналу в условиях нарушения штатного режима движения поездов или сбоя в работе технических средств;
- Формирование и ведение базы данных о качестве перевозочного процесса, параметрах функционирования аппаратуры СЖАТ и действиях эксплуатационного персонала с передачей этой информации в дорожный центр управления перевозками (ЕДЦУ).

Уровень 2 (Системы приготовления маршрутов и системы интервального регулирования движения поездов ИСУЖТ).

Решаемые задачи:

1. Подготовка маршрутов следования поездов с контролем правильности выполнения этой операции.
2. Контроль правильности выполнения зависимостей в устройствах обеспечения безопасности движения поездов.
3. Выполнение команд прямого управления, передаваемых с 1-го уровня.
4. Безопасное управление маршрутами движения поездов (обеспечение безопасности движения) на основе системы многоконтурного интервального регулирования с помощью трех систем интервального регулирования движением (СИР) с различными способами определения координат поездов:
 - СИР1 – на базе рельсовых цепей /счетчиков осей (напольных датчиков на пути);
 - СИР2 – на базе информации, получаемой с помощью спутниковой навигационной системы (СНС);
 - СИР3 – на базе информации, передаваемой с локомотивов по каналам цифровой радиосвязи (при этом бортовая аппаратура дополняется устройствами контроля целостности состава).
5. Формирование и передача на локомотивы команд о допустимой скорости движения.

Основной системой интервального регулирования на первом этапе функционирования МС является

СИР1. Эта система удовлетворяет требованиям функциональной безопасности как в части принципов реализации программно-технических средств, так и в части принципа определения координаты поездов с помощью рельсовых цепей. При выявлении неисправностей в работе СИР1 управление передается одновременно двум другим системам: СИР2 и СИР3, работа которых осуществляется по схеме «И». Такая схема работы этих систем применена ввиду того, что методы определения координат поездов в этих системах не удовлетворяют в полной мере требованиям обеспечения функциональной безопасности.

Уровень 3 (единая комплексная локомотивная система управления и обеспечения безопасности движения поезда):

Решаемые задачи, в части подсистемы (КЛУБ-У, БЛОК):

1. Прием и выполнение команд, передаваемых с 1-го и 2-го уровней.
2. Контроль и ограничение скорости движения локомотива.
3. Контроль выполнения планового графика (расписания) движения на участке (при задании информации от системы автоведения).
4. Контроль работоспособного состояния машиниста.
5. Контроль несанкционированного движения поезда.
6. Исключение проезда светофоров с запрещающим показанием без разрешения диспетчера (дежурного по станции).
7. Контроль за режимом снижения скорости поезда перед запрещающим показанием светофора и в местах ограничения скорости.
8. Логический контроль входной информации по приоритету безопасности.

Последний пункт является принципиальным для МС, т.к. позволяет использовать для повышения безопасности движения информацию не только традиционных СЖАТ, но и также другие виды информации с приоритетом ее обработки по критерию безопасности.

Для решения комплекса проблем обеспечения безопасности используются системы:

- автоматического ведения поезда, которая служит для автоматизированного и безопасного ведения поезда по расписанию с использованием энергооптимального алгоритма управления;
- автоматического управления торможением с контролем эффективности тормозных средств.

По мере оснащения участков железных дорог техническими средствами третьего уровня упраздняются проходные светофоры, система интервального регулирования строится на базе «подвижных» блок-участков.

Системы увязаны на программно-интерфейсном уровне и должны содержать единую нормативно-справочную информацию с характеристикой участка и другими справочными материалами, необходимыми для оперативного управления движением поездов.

Структурная схема **системы обеспечения безопасности** приведена на рис. 2.



Рис.2. Структурная схема системы обеспечения безопасности движения поездов.

Первый уровень обеспечения безопасности движения базируется на традиционных СЖАТ: электрической централизации (централизации управления стрелками и сигналами); автоблокировке; локомотивной сигнализации; диспетчерской централизации.

Второй уровень обеспечения безопасности контролирует логические зависимости при взаимодействии систем 1-го уровня, проверяет правильность работы диспетчеров на станции, осуществляет передачу дополнительных команд управления на локомотив в зоне станции и включает в себя:

- ♦ модули контроля логических зависимостей СЖАТ и действий оперативного персонала;
- ♦ маневровую автоматическую локомотивную сигнализацию МАЛС;
- ♦ систему передачи команд блокирования управления.
- ♦ На втором уровне реализуются следующие требования к системе:
- ♦ принудительная остановка поезда или маневрового состава при нарушении условий безопасности;
- ♦ блокирование зависимостей СЖАТ при опасном отказе или несанкционированном вмешательстве в работу устройств;

- ♦ блокирование действий операторов (дежурных по станции (ДСП), поездных диспетчеров (ДНЦ) при нарушении порядка пользования устройствами.

Третий уровень обеспечения безопасности включает модули систем диспетчерского управления удаленными объектами и предусматривает:

- дублирование функции определения координаты поезда и занятости участка пути по информации, передаваемой по радиоканалу с поезда и по системе спутниковой навигации;
- логический контроль правильности действий систем автоматики на объектах управления и диспетчера.

Функции управления маршрутами и обеспечения безопасности движения поездов МС реализует в двух направлениях:

- активное воздействие на объекты управления, включая экстренную остановку поезда при нарушении условий безопасности движения;
- формирование прогноза развития поездного положения, выработка рекомендаций для оперативного персонала по оптимальному разрешению конфликтных ситуаций.

Влияние человеческого фактора на безопасность при таком построении системы сводится к минимуму, так как ошибки оператора могут приводить только к ухудшению надежности системы, что возможно компенсировать известными методами резервирования и сервисного обслуживания.

Основные концептуальные смето- и программно-технические методы повышения безопасности движения поездов в МС ИСУЖТ сводятся к следующим:

- дублирование функций обеспечения безопасности движения поездов посредством технических средств вышестоящих ступеней системы;
- управление следованием маршрутов поездов должно осуществляться посредством системы многоконтурного регулирования с помощью нескольких систем интервального регулирования движением поездов (СИР) с различными способами определения координат поездов: на базе рельсовых цепей; на базе информации, получаемой с помощью спутниковой радионавигационной системы; на базе информации о координатах поезда, получаемой с локомотива;
- введение контроля соблюдения поездами безопасного интервала следования не только по пути, но и по времени в установленных точках пути на станциях и перегонах;
- применение централизованного диагностирования состояния аппаратуры СЖАТ и контроля правильности действий эксплуатационного персонала;
- построение безопасной микропроцессорной аппаратуры всех уровней системы в виде двухканальных

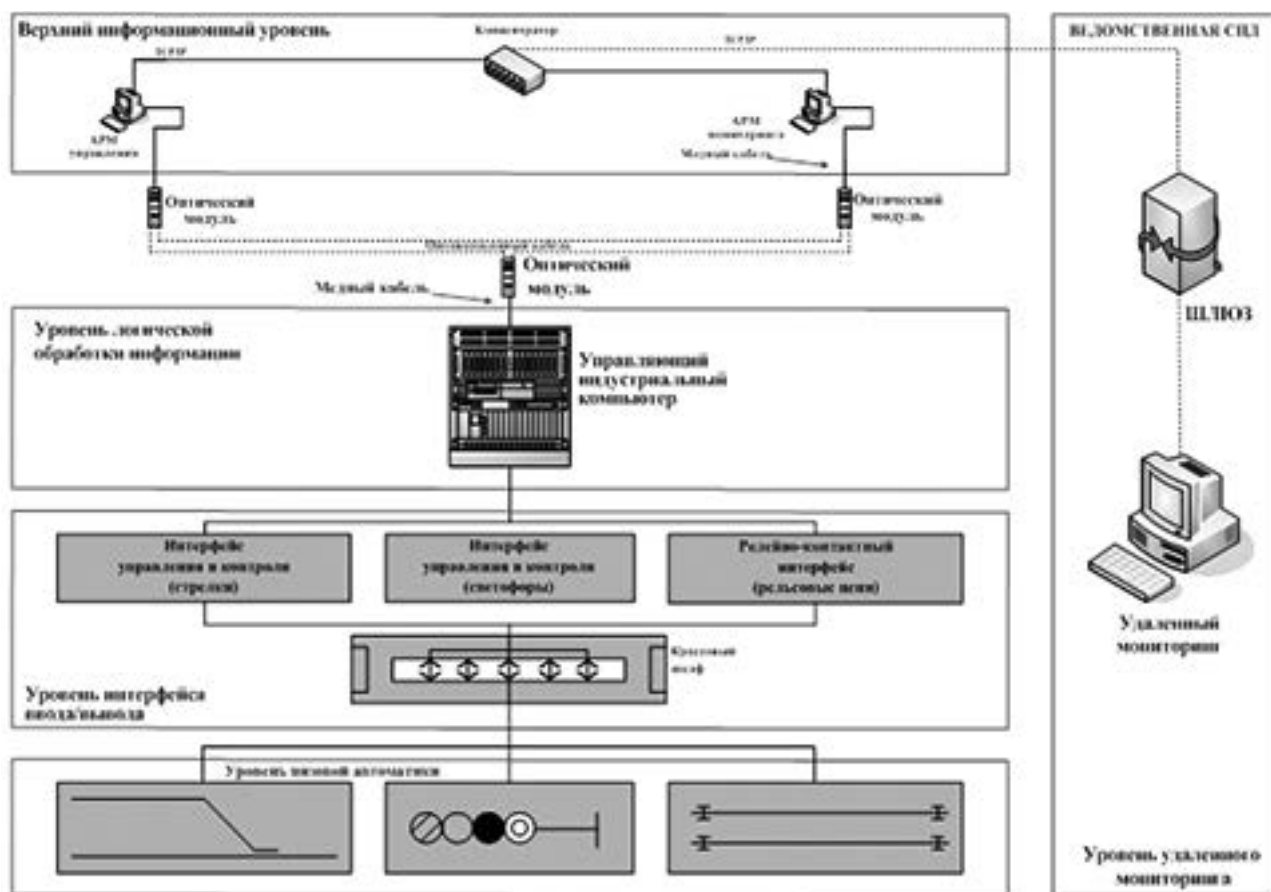


Рис. 3. Обобщенная структурная схема МПСУ ЖАТ

устройств, обеспечивающих независимость обработки информации в каналах и сравнение результатов этой обработки безопасной схемой сравнения;

- использование во всех модулях системы средств встроенной диагностики, выявляющих и индицирующих отказы;
- использование в каналообразующей аппаратуре многократной передачи информации и избыточного кодирования в информационных сообщениях;
- применение узлов сравнения и исполнительных элементов для реализации ответственных команд, построенных по принципам самоконтроля одиночных отказов по полному перечню дефектов с учетом возможности накопления неконтролируемых отказов за периоды времени, определяемые профилактическими осмотрами;
- использование небезопасных систем обработки информации в сочетании с традиционными безопасными устройствами с введением приоритета принятия решений и ограничением работы этих систем по времени;
- использование естественной информационной избыточности систем для введения дополнительного логического контроля соблюдения требований безопасности при работе СЖАТ;

- использование оперативной информации о нарушениях безопасности движения в технологическом процессе для формирования команд ограничения скорости движения в СЦБ.

Под условным названием «нижний уровень управления» рассматриваются системы и компоненты информационных технологий (ИТ) железнодорожного транспорта, непосредственно связанные с управлением движением поездов, маневровой и сортировочной работой, обеспечением безопасности движения, непосредственным контролем технического состояния и обслуживанием подвижного состава и путевой инфраструктуры (МПСУ ЖАТ, бортовые системы безопасности и т.д.) см. рис. 3.

Основные особенности нижнего уровня с точки зрения обеспечения кибербезопасности:

1. Системы и компоненты нижнего уровня имеют непосредственное отношение к безопасности движения и представляют собой критические технологии. Таким образом, ИТ на нижнем уровне должны отвечать требованиям, предъявляемым с точки зрения функциональной безопасности. Решения в части кибербезопасности также должны быть согласованы с требованиями функциональной безопасности.

2. ИТ нижнего уровня критичны ко времени формирования, передачи и обработки информации и предъявляют повышенные требования к целостности и доступности данных, а также полноте, своевременности и точности ввода, обработки и передачи информации.
3. Как правило, конфиденциальная информация на нижнем уровне либо отсутствует, либо ее обработка может (и должна) быть вынесена в смежные системы. Так, к примеру, управление движением поездов осуществляется в терминах графиков и маршрутов движения, не требуя коммерческой информации (о характере груза, его владельце, стоимости и др.).

Таким образом, в качестве главных угроз кибербезопасности на нижнем уровне управления ИСУЖТ следует рассматривать, прежде всего, нарушение функционирования критических технологий, способное привести к нарушению функциональной безопасности и большому ущербу от аварий и сбоев перевозочного процесса.

В современных условиях компоненты ИТ нижнего уровня не могут быть физически полностью изолированы от смежных систем (систем управления перевозочным процессом, ремонтом и обслуживанием подвижного состава, ERP, CRM и других). С одной стороны, системы и компоненты ИТ нижнего уровня могут и должны получать информацию от смежных систем (например, управляющую информацию от вышестоящих систем в вертикали управления перевозками). С другой – системы и компоненты ИТ нижнего уровня являются важнейшим источником информации для смежных систем.

При этом системы и компоненты нижнего уровня должны быть устойчивы к кибератакам, использующим информационное воздействие на программы и комплексы управления, в том числе, не допускать таких информационных воздействий со стороны компонент смежных систем..

В связи с этим, особую актуальность на нижнем уровне управления приобретает, в частности, предотвращение проникновения вредоносного кода через компьютерные сети и смежные системы, а также предотвращение воздействия вредоносного кода, проникшего в смежные системы и корпоративные компьютерные сети.

Учитывая особенности систем и компонент ИТ нижнего уровня управления, основными направлениями обеспечения их кибербезопасности в ИСУЖТ являются:

1. Разработка и внедрение безопасных интерфейсов на всех стыках информационного обмена со смежными системами.

2. Внедрение систем мониторинга событий безопасности на нижнем уровне управления и их интеграцию с безопасными интерфейсами. При этом необходимо учитывать специфику требований и ограничений ИТ нижнего уровня управления, а также особенности защищаемых систем и компонент ИТ.
3. Разработка и внедрение алгоритмов и средств реагирования на регистрируемые события безопасности, а также соответствующего организационного обеспечения (регламенты и проч.). В частности, реагирование на события безопасности может предусматривать управление конфигурацией и режимами работы безопасных интерфейсов.

Перечисленные основные направления должны рассматриваться в контексте комплексной защиты критических ИТ на нижнем уровне управления ИСУЖТ.

Одной из важнейших функций подсистемы управления и обеспечения безопасности движения поездов (ПУОБДП), выполняемых в рамках ИСУЖТ, является оценка рисков наступления опасных ситуаций и выработка превентивных мер для их предотвращения.

Для эффективного управления предотвращения рисков (или управления рисками) создается специализированная нормативная и методическая база, учитывающая как вопросы оценки рисков, так и механизмы финансирования мероприятий по снижению рисков согласно инвестиционным приоритетам. В условиях ограниченности организационных и финансовых ресурсов в приоритетном порядке должны быть снижены самые высокие и значимые риски.

В рамках проекта УРРАН в ОАО «РЖД» уже проведена большая работа по анализу требований международных (ISO31000:2009, IEC/ISO31010:2009, EN 50126 и других) и государственных (ГОСТР51897 2011, ГОСТР 51901.1 2002 и других) стандартов в области менеджмента риска и определению их применимости к российскому железнодорожному транспорту и разработан ряд корпоративных стандартов, направленных на реализацию системы управления рисками в ОАО «РЖД».

Разработаны и утверждены национальные стандарты ГОСТ Р 54505-2011 «Безопасность функциональная. Управление рисками на железнодорожном транспорте» и ГОСТ Р 54504-2011 «Безопасность функциональная. Политика, программа обеспечения безопасности. Доказательство безопасности объектов железнодорожного транспорта», которые являются основой для создания системы управления рисками.

Эти стандарты устанавливают комплекс требований и подходов, позволяющих реализовать полнофункциональную и эффективную систему управления рисками. Они гармонизированы с международными и европейскими стандартами в области функциональной безопасности и управления рисками, согласованы

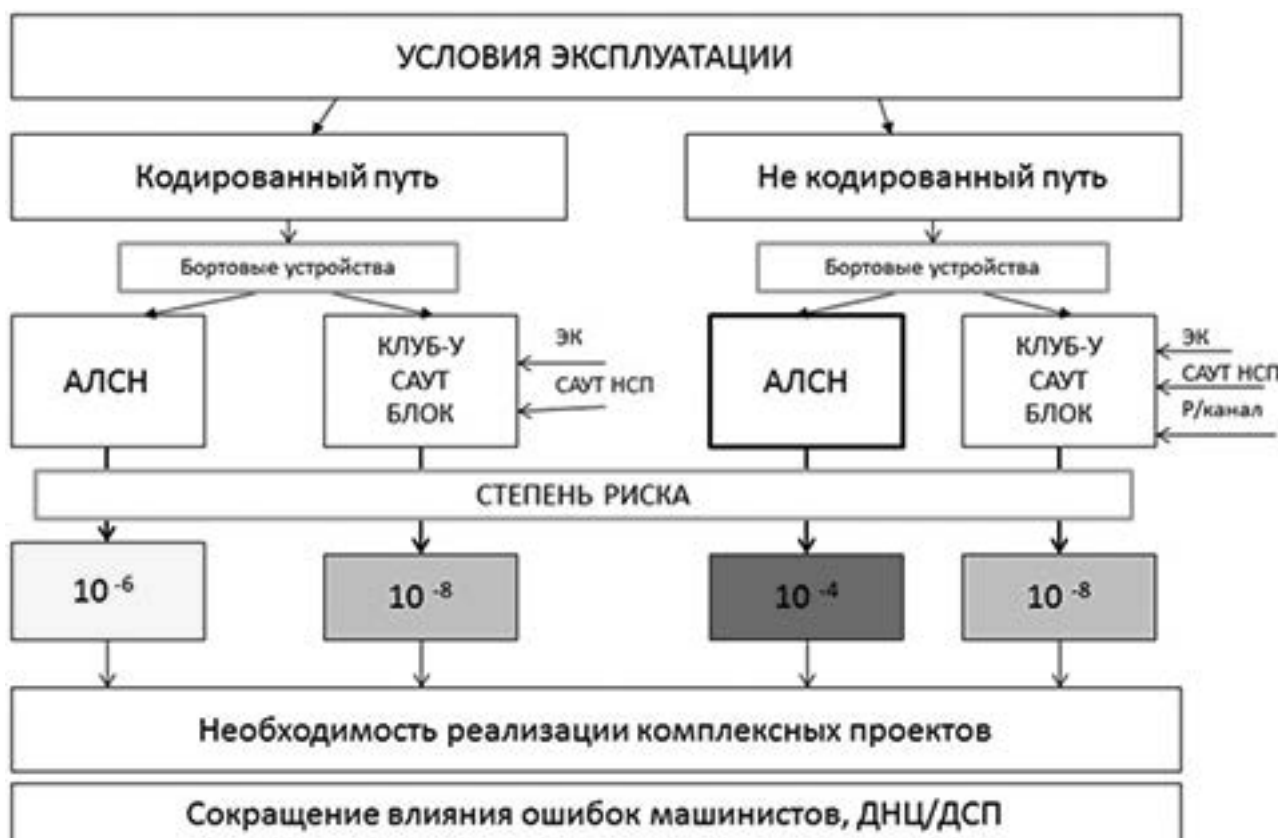


Рис.4. Взаимодействие стационарных и бортовых приборов безопасности на различных участках движения поездов

с существующими стандартами в области железнодорожного транспорта. Положения стандартов одобрены техническими комитетами по стандартизации ТК45 «Железнодорожный транспорт» и ТК58 «Функциональная безопасность». Заложенные в данных стандартах подходы к управлению рисками адекватны подходам, применяемым Институтом машиноведения Российской академии наук (ИМАШ РАН), который является ведущей научной организацией России в области безопасности и рисков технических систем.

Применение методов управления рисками в составе комплексной методологии УРРАН позволит контролировать и поэтапно минимизировать риски в порядке их значимости, в том числе и для задач обеспечения кибербезопасности АСУ ТП в ОАО «РЖД».

Особенностью методологии УРРАН является то, что она не только расширила нормативы серии стандартов RAMS (EN 50125, EN 50129), но и включила в себя такие элементы для анализа рисков, как долговечность, экологический и профессиональный риск, живучесть систем управления и экономические показатели.

При этом учитываются все стадии жизненного цикла, что позволяет использовать подходы к созданию сложных систем управления движением поездов, определенные стандартами CENELEC и ГОСТ Р/МЭК 61508 с уровнями SIL 1 – SIL 4. При этом учитываются такие сложные

программно-аппаратные комплексы, используемые в микропроцессорных системах управления (МПСУ), как цифровые системы связи, спутниковая навигация ГЛОНАСС/GPS, счетчики осей и др. Для эксплуатирующихся систем управления эти подходы позволяют оценивать взаимодействие стационарных и бортовых устройств управления с учетом рисков (рис.4).

Оценку риска для программного обеспечения (ПО) АСУТП, входящих в ИСУЖТ, производят в соответствии с ГОСТ Р 54505 и ГОСТ Р ИСО/МЭК 27005 «ИТ. Методы и средства обеспечения безопасности. Менеджмент риска информационной безопасности».

Целью оценки риска для ПО АСУТП является проведение необходимого анализа для принятия обоснованных решений для последующего выбора оптимальных способов защиты от риска, а также принятие решения об уровне допустимости риска.

Таким образом, рассмотрено решение новых задач, реализуемых в ИСУЖТ, на основе информации, получаемой от традиционных и современных средств ЖАТ нижнего уровня и систем управления верхнего уровня, что дает возможность реализовать интеллектуальные методы многоуровневого обеспечения безопасности, позволяющие защитить подсистему управления движением поездов от рисков опасных воздействий возмущающих факторов.

Махутов Н.А., Гаденин М.М., *Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, г. Москва*
 Соколов А.М., Титов Е.Ю., *ОАО «ВНИИЖТ», г. Москва*

Основы анализа рисков природно-техногенных опасностей и их мониторинг для объектов железнодорожного транспорта

Современное состояние обеспечения и поддержания штатного функционирования объектов и инфраструктуры железнодорожного транспорта характеризуется соблюдением традиционных методов, норм и правил конструирования, изготовления и эксплуатации инфраструктуры и подвижного состава железнодорожного транспорта. При этом аварийные и катастрофические ситуации пока не являются предметом рассмотрения этих норм и правил. Усложнение современных объектов и условий их эксплуатации, сопровождающееся все нарастающим числом аварий и катастроф с большими ущербами, требует принципиально новых подходов к управлению и развитию железнодорожного транспорта по критериям и результатам мониторинга рисков его критически и стратегически важных объектов с учетом нарастающих опасностей природно-техногенного и антропогенного характера [1-4]. Развитие такого подхода применительно к железнодорожному транспорту и его инфраструктуре соответствует мировым тенденциям в авиационной, ракетно-космической и атомной технике. Так, например, опыт взаимодействия Роскосмоса и РАН в прошедшие десятилетия показал, что если в ракетно-космической технике происходит катастрофа (детально разбирались причины около 50 тяжелых катастроф), то в последующем ни разу не повторялись одна и та же сценарная картина и источник аварий, то есть удавалось так реализовать исследования и устранение обнаруженных дефектов и ошибок, что происходящие потом аварии были вызваны другими причинами.

Основопологающим документом в сфере регулирования жизнедеятельности государства становится «Стратегия национальной безопасности Российской Федерации до 2020 года», утвержденная Указом Президента Российской Федерации от 12 мая 2009 года, №537. Поручением Президента Российской Федерации от 26 мая 2009 г. предусмотрена разработка комплексных мероприятий по реализации этой «Стратегии». «Стратегия» является официально признанной системой стратегических приоритетов, целей и мер в области внутренней и внешней политики, определяющих состояние национальной безопасности и уровень устойчивого развития государства на долгосрочную перспективу. В «Стратегии» определены главные стратегические риски и угрозы национальной безопасности, сформулирована задача системы научного и тех-

нологического прогнозирования и риски для научных и технологических приоритетов, усиления интеграции науки, образования и производства, создания комплексной системы контроля над рисками [1, 5].

Систематические фундаментальные и прикладные исследования, выполненные в последние два десятилетия научными институтами Российской академии наук, научными организациями МЧС России, Минобрнауки России, Минобороны России, Минпромторга России, Минэкономразвития России, Минтранса России, Ростехнадзора и Ростехрегулирования-Росстандарта создали основы новых подходов к обеспечению защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций [1, 2], к анализу промышленной, экологической, радиационной, химической, энергетической безопасности (рис. 1).



Рис. 1. Национальная и межведомственная организация работ по научному обеспечению комплексной безопасности

Научные исследования, поддержание и повышение уровня регулирования техногенной безопасности становятся все более важной задачей фундаментальной науки, органов государственного управления и надзора, специалистов отраслей и промышленных предприятий. В соответствии с федеральным законодательством, федеральной и отраслевой нормативной документацией, федеральными, региональными и отраслевыми программами управление промышленной безопасностью в настоящее время переводится на рисковую основу [1-8].

Анализ и обобщение многочисленных данных (измеряемых тысячами и десятками тысяч в наиболее развитых странах) позволили провести определенную классификацию техногенных и природно-техногенных аварий и катастроф [1, 6]. По масштабам охваченными территориями, по числу жертв и пострадавших, по экономическому и экологическому ущербу при такого рода классификации могут быть выделены планетарные, глобальные, национальные, региональные, местные, объектовые и локальные катастрофы (рис. 2).



Рис. 2. Категорирование чрезвычайных ситуаций, ущерба и периодичность природных и техногенных аварий и катастроф

По степени потенциальной опасности, приводящей к подобным катастрофам в техногенной сфере, можно выделить объекты ядерной, химической, металлургической и горнодобывающей промышленности, уникальные инженерные сооружения (плотины, эстакады, нефтегазохранилища), транспортные системы (аэрокосмические, надводные и подводные, наземные, включая железнодорожные), перевозящие опасные грузы и большие массы людей, магистральные газо-, нефте-, продуктопроводы. Сюда же относятся опасные объекты оборонного комплекса – ракетно-космические и самолетные системы с ядерными и обычными зарядами, атомные подводные лодки и наземные суда, крупные склады обычных и химических вооружений.

Аварии и катастрофы на указанных объектах могут инициироваться опасными природными явлениями - землетрясениями, ураганами, штормами. Сами техногенные аварии и катастрофы при этом могут сопровождаться радиационными и химическими повреждениями и заражениями, взрывами, пожарами, обрушениями. Типы и параметры поражающих факторов при этом могут изменяться в весьма широких пределах.

При этом большинство аварий и катастроф сопровождается нарушением условий прочности и исчерпанием ресурса наиболее нагруженных элементов рассматриваемых инженерных конструкций в штатных или аварийных ситуациях. Вероятности $P(t)$, характеризующие периодичность возникновения наиболее тяжелых катастроф в мирное время составляют от $(2 \div 3) \times 10^{-2}$ до $(0,5 \div 1) \times 10^{-1}$ 1/год, а ущербы $U(t)$ – от 10^{11} до 10^9 долл./катастрофа. При этом их риски $R(t)$ изменяются в пределах от 10^4 долл./год до 10^{10} долл./год.

При анализе безопасности техногенной сферы следует учитывать как упомянутые выше ущербы, так и серийность соответствующих потенциально опасных объектов. Наиболее тяжелые аварийные ситуации возникают на уникальных объектах гражданского и обо-

ронного назначения - единичных и многосерийных. Так, например, число однотипных атомных энергетических реакторов составляет 1–10 при их общемировом числе в эксплуатации 450–500, число однотипных ракетно-космических систем обычно составляет от 3–5 до 50–80 (рис. 3). Среднесерийные потенциально опасные объекты исчисляются сотнями и тысячами, а крупносерийные – десятками и сотнями тысяч (автомобили, сельскохозяйственные машины, станки).

В соответствии с изложенным интегральные экономические риски, определяемые произведением единичных рисков на число объектов, оказываются сопоставимыми как для глобальных, так и для объектовых аварий и катастроф. Таким образом, ущербы от единичных катастроф глобального и объектового масштаба отличаются на 8–10 порядков, риски на 4–6 порядков, а интегральные ущербы на 1–3 порядка при семи классах техногенных и природно-техногенных катастроф по рис. 2. При этом исключительно важное значение имеет достигнутый уровень проектного обоснования безопасности потенциально опасных объектов, в том числе по критериям прочности и ресурса.

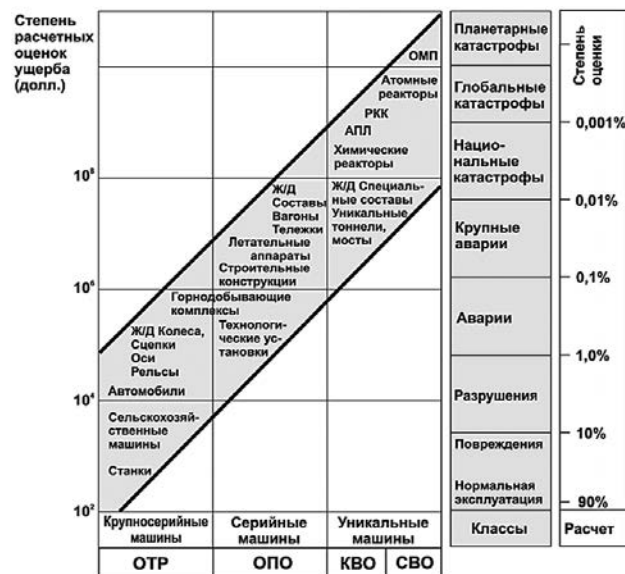


Рис. 3. Ущерб на одну катастрофу от необеспечения надежности и безопасности различных категорий объектов техносферы

Из данных о вероятностях и рисках техногенных аварий и катастроф на объектах с исключительно высокой потенциальной опасностью следует, что различие в уровнях требуемых и приемлемых (в национальных и международных рамках) рисков, с одной стороны, и уровнем реализованных рисков, с другой, достигает двух и более порядков. Сказанное выше потребовало постановки на национальном и международном уровнях новых фундаментальных и прикладных научных задач [6, 9–12]:

- математической теории катастроф и вероятностной теории рисков;
- физики, химии и механики аварийных ситуаций и катастроф;
- теории предельных состояний, прочности и ресурса с учетом аварийных и катастрофических ситуаций;
- теории жесткой, функциональной и комбинированной аварийной защиты объектов, операторов и персонала;
- теории мониторинга и прогнозирования (с применением космических, воздушных и наземных систем) сценариев и последствий техногенных катастроф;
- научных методов, технологий и техники ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций техногенного характера.

По уровню потенциальной опасности (рис. 2, 3), по требованиям законодательства и с учетом риска возникновения аварий и катастроф объекты техносферы могут быть разделены (рис. 4) на четыре основные категории (группы), для которых предусмотрены соответствующие требования к безопасности [1, 6]:

- объекты технического регулирования (ОТР), безопасность эксплуатации которых обеспечивается по закону о техническом регулировании – их число измеряется миллионами и десятками миллионов;
- опасные производственные объекты (ОПО), безопасность эксплуатации которых обеспечивается по закону о промышленной безопасности – их число измеряется сотнями тысяч;
- критически важные объекты (КВО), безопасность эксплуатации которых обеспечивается по решению Совета Безопасности Российской Федерации – их число измеряется тысячами;
- стратегически важные объекты (СВО), безопасность функционирования которых влияет на состояние национальной безопасности страны – их число измеряется сотнями.



Рис. 4. Структура схема категорирования потенциально опасных объектов

Система государственного надзора за безопасностью на большом числе СВО, КВО, ОПО и ОТР охватывает широкий спектр технологий, сценариев катастроф, видов повреждений, условий нагружения, методов диагностики и контроля.

Из данных рис. 2, 3 следует, что в настоящее время в наибольшей степени проявляется актуальность анализа рисков тяжелых катастроф (5–7 классов по рис. 2) для стратегически важных объектов (СВО). Возможности расчетных оценок рисков в этом случае пока крайне низки (менее 0,01% по рис. 3).

Для объектов железнодорожной инфраструктуры и подвижного состава, перевозящего особо опасные грузы (химически-, радиационно- и биологически опасные) категорий СВО, КВО и ОПО типы аварийных и катастрофических ситуаций и степень их защищенности при переходе от нормальных условий эксплуатации к аварийным можно охарактеризовать по рис. 5 и определить как [4, 6-8]:

- штатные ситуации при функционировании объектов железнодорожного транспорта в пределах, установленных нормами и правилами;
- режимные аварийные ситуации при отклонении от нормальных условий эксплуатации (возникают при штатном функционировании потенциально опасных объектов, последствия от них предсказуемые, защищенность от них достаточная);
- проектные аварийные ситуации (возникают при выходе за пределы штатных режимов с предсказуемыми и приемлемыми последствиями, защищенность от них частичная);
- запроектные аварийные ситуации (возникают при необратимых повреждениях ответственных элементов с высокими ущербами и человеческими жертвами и с необходимостью в последующем проведения восстановительных работ; степень защищенности от них недостаточная);
- гипотетические аварийные ситуации (могут возникать при непредсказанных заранее вариантах и сценариях развития с максимально возможными ущербами и жертвами; защищенность от них низкая и прямому восстановлению объекты не подлежат).

№	Аварийные ситуации	Защищенность	Риски
1.	Нормальные условия эксплуатации	Повышенная	Управляемые
2.	Отклонения от нормальных условий (режимные ЧС)	Достаточная	Регулируемые
3.	Проектные аварии	Частичная	Анализируемые
4.	Запроектные аварии	Недостаточная	Повышенные
5.	Гипотетические аварии	Низкая	Высокие

Рис. 5. Типы чрезвычайных ситуаций и степень защищенности от них объектов

Для ОТР и ОПО анализируются ситуации 1–3 по рис. 5, для КВО – соответственно ситуации 1–4, для СВО – ситуации 1–5. Применительно к объектам железнодорожного транспорта наиболее сложным представляется анализ запроектных и гипотетических аварий с высоким уровнем рисков.

При разработках методов и систем обеспечения защиты объектов железнодорожной инфраструктуры от угроз природного, техногенного и террористического характера должны постулироваться названные выше аварийные ситуации и учитываться необходимость решения двух базовых задач:

- снижение рисков инициирующих воздействий и предупреждение возникновения чрезвычайных ситуаций;
- снижение рисков развития чрезвычайных ситуаций вследствие реализовавшихся угроз.

При детальном рассмотрении всех типов чрезвычайных ситуаций с позиций механики деформирования и разрушения объектов техносферы в первую очередь анализируются как линейные, так и нелинейные закономерности деформирования и разрушения с использованием параметров напряжений s становятся и деформаций e . При возрастании этих параметров преобладающие повреждения в элементах машин и конструкций от вибраций и усталости переходят в повреждения от малоциклового усталости. Еще большее возрастание s и e обуславливает переход к гипотетическим авариям и катастрофам. При этом теоретической основой анализа таких ситуаций является статическая и динамическая нелинейная механика разрушения [6, 9, 11–13].

Научные исследования по поддержанию и повышению уровня эксплуатационной безопасности объектов техносферы по критериям прочности, надежности и ресурса призваны обеспечить приемлемый уровень их защищенности. Если проанализировать представленные на рис. 6 данные о структуре и подходах к нормированию расчетов по обеспечению безаварийной эксплуатации объектов техносферы, то можно видеть те проблемы, которые на протяжении почти столетия решались во всех отраслях техники, в том числе и на железнодорожном транспорте [6].

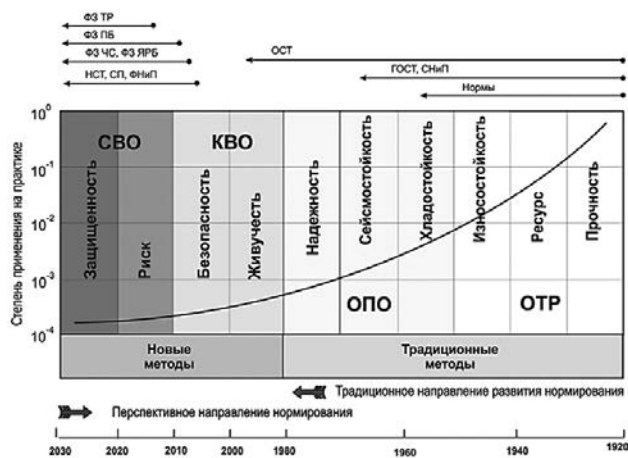


Рис. 6. Структура и направления развития методов нормирования

Если рассмотреть их в направлении развития традиционных подходов к нормированию (т.е. справа налево), то можно увидеть исходные проблемы: прочность, ресурс, износостойкость, хладостойкость, сейсмостойкость. Эти проблемы были очевидны, и до 70-х годов прошлого века на основе результатов их решения в нашей стране была создана соответствующая нормативная база (ОСТы, ГОСТы, СНиПы, нормы). Далее, вплоть до второго десятилетия XXI века, происходило углубление научного понимания новых и актуальных проблем качества и работоспособности конструкций через введение в рассмотрение проблем надежности, живучести, безопасности и риска. Проблема нормирования защищенности от аварий и катастроф будет решаться на последующей стадии. На рис. 6 кривой показана степень применения на практике действующей и перспективной нормативно-технической и исследовательской базы.

Вопросы нормирования прочности в рамках сложившихся традиционных методов решаются в достаточно полной мере (от 10⁻¹ до 10⁰ случаев расчетов). По мере усложнения решаемых задач в направлении от прочности и ресурса до риска и защищенности степень применяемых методов расчета резко снижается (от 10⁻⁴ до 10⁻³ случаев). Восстановление до приемлемого уровня степени применения новых методов (до 10⁰) в общей структуре нормативно-технических документов по использованию новых критериев – надежности, живучести, безопасности, риска – это то направление, которое предстоит реализовать применительно к объектам железнодорожного транспорта. В решении этих проблем важную роль играют Федеральные законы о промышленной безопасности (ПБ), транспортной безопасности (ТБ), о чрезвычайных ситуациях (ЧС), о ядерной и радиационной безопасности (ЯРБ).

Первая, основная задача перехода от традиционных методов к новым методам состоит в том, что при решении проблемы обеспечения условий безопасной эксплуатации объектов железнодорожного транспорта следует двигаться по рис. 6 не в традиционном направлении справа налево, а в перспективном направлении – слева направо, т.е. изначально решать задачи достижения заданных рисков и заданной защищенности от возможных аварий и катастроф и требовать применения таких норм расчетов и испытаний, которые обеспечивали бы приемлемый уровень этих заданных параметров защищенности и риска рассматриваемых объектов.

Вторая сторона рассматриваемой проблемы связана с тем, что железнодорожный транспорт уникален содержанием в себе широкого набора всех тех элементов, объектов и систем, к которым для анализа условий их безопасной эксплуатации выдвинуты новые

требования со стороны Совета Безопасности и надзора за транспортной безопасностью (рис. 7). В их число входят объекты технического регулирования – ОТР (болты, шпильки, гайки, оси, колеса, сцепки, рельсы, шпалы и т.д.). В составе объектов железнодорожного транспорта присутствуют также опасные производственные объекты – ОПО, участвующие в перевозочном процессе, к которым можно отнести локомотивы, составы, вагоны, тележки. Далее в рассмотрение вводятся критически важные для безопасности объекты – КВО (например, большегрузные и специальные составы). В ряде случаев должны анализироваться стратегически важные объекты – СВО (специальные составы, крупнейшие мосты, тоннели), для которых в принципе неприемлемо применение старой традиционной нормативной базы.

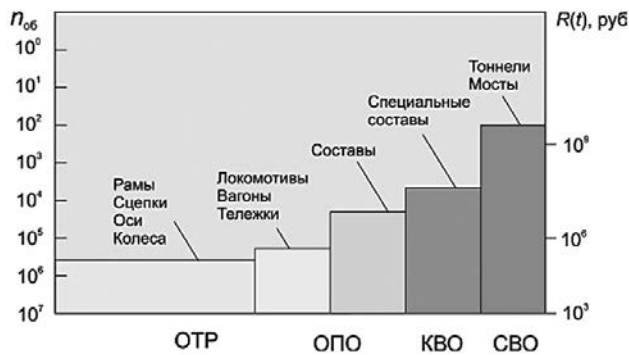


Рис. 7. Категорирование объектов железнодорожного транспорта по уровням обеспечения безопасности при возникновении чрезвычайных ситуаций

Таким образом, на рис. 6 с его левой стороны расположены новые методы и критерии и особо важные объекты (СВО, КВО), при расчетно-экспериментальном анализе которых требуется исследование и обеспечение таких свойств, как защищенность, риск, безопасность и живучесть, хотя степень их анализа в настоящее время на практике может составлять лишь доли процента. Но если рассматривать традиционные методы нормирования эксплуатационных показателей элементов и объектов железнодорожного транспорта (надежность, сейсмостойкость, хладостойкость, износостойкость, ресурс, прочность), то следует отметить, что в этом случае для ОПО и КВО состояние критериальной базы и степени её применения на практике относительно удовлетворительное.

Приведенная на рис. 6 схема сочетания традиционных и новых методов анализа и нормирования комплексных характеристик эксплуатационной безопасности в своем полном объеме и должна быть реализована на железнодорожном транспорте. При этом следует иметь ввиду, что это совсем не рядовая исследовательская, конструкторская и технологическая инженерная задача, а комплексная научно-прикладная

проблема, в решении которой должны быть задействованы как академические исследовательские ресурсы, так и научно-инженерный потенциал железнодорожной отрасли.

Интегральным количественным показателем реализации современных требований к прочности, ресурсу, износостойкости, хладостойкости, сейсмостойкости, надежности, живучести и безопасности инженерных объектов в настоящее время и в ближайшей перспективе для СВО, КВО, ОПО, ОТР может быть принят параметр риска [1, 6]. При этом на заданной стадии t жизненного цикла анализируемого объекта риск возникновения применительно к нему $R_i(t)$ неблагоприятного i -события должен быть меньше, чем заданный для этого объекта приемлемый риск $[R_i(t)]$, который определяется путем снижения неприемлемого (критического) уровня риска $R_{ic}(t)$ на величину запаса n_R .

$$[R_i(t)] = \frac{R_{ic}(t)}{n_R} \quad (1)$$

Зависимость (1) является условием обеспечения эксплуатационной безопасности рассматриваемого объекта. Сами риски (формирующиеся, действующие $R_i(t)$ и приемлемые $[R_i(t)]$) определяются через два основных параметра: вероятность возникновения того или иного неблагоприятного i -го события $P_i(t)$ и возможный ущерб $U_i(t)$ от реализации этого события.

Обеспечение условий безопасной эксплуатации железнодорожной инфраструктуры и подвижного состава неразрывно сопряжено с анализом условий возникновения потенциальных вызовов, опасностей, угроз и их поэтапной реализации. В теории безопасности под рисками R понимаются такие сочетания вероятностей P возникновения неблагоприятных событий (опасных и кризисных явлений, катастрофических, аварийных и чрезвычайных ситуаций) с одной стороны, и математического ожидания ущербов U , с другой, которые определяют изменение уровня безопасности и систем защищенности человека, объектов инфраструктуры и среды обитания от угроз и опасностей внутреннего и внешнего характера – техногенных, природных, антропогенных. Интегральные риски при этом определяются соответствующей зависимостью как произведение, сумма или интеграл:

$$R = PU = \sum_i P_i U_i = \int C(P)U(P)dP = \int C(U)P(U)dU, \quad (2)$$

где P_i , U_i – вероятности и ущербы от основных (дифференцированных) неблагоприятных событий; C – весовые функции.

Риски, как междисциплинарная научная основа оценки комплексной безопасности, базируются на закономерностях, методах, уравнениях и критериях,

полученных в фундаментальных областях знаний – математике, физике, химии, механике, информатике, машиноведении, биологии, физиологии, геологии, геофизике, физике атмосферы и океана, географии, философии, социологии, психологии, экономике, правоведении. Обобщающими для анализа интегральных рисков являются развитие теории системного анализа, теории хаоса и порядка, теории управления, теории катастроф и построения защит, методы математического и имитационного моделирования, прогнозирования, математической статистики, методы и системы диагностики и мониторинга.

Как упоминалось выше, интегральные стратегические риски (R_s) могут быть рассчитаны по выражению типа (2) как произведение, сумма или интеграл двух величин P_i и U_i – соответственно вероятностей и ущербов от отдельных основных неблагоприятных (опасных, кризисных, катастрофических) i -событий. В простейшем случае величины P_i оцениваются как частоты F (1/год) наступления неблагоприятных событий в год. Величины ущербов U_i связываются с типом неблагоприятного события и могут определяться большим числом параметров. При оценках рисков ущербы U_i могут оцениваться числами пострадавших людей N или экономическими потерями E (в рублях); тогда риски будут измеряться в величинах [1/год, руб/год]. По аналогии с общепринятыми кривыми типа « $F-N$ » (F – частота, N – число пострадавших) для рисков природно-техногенных катастроф можно в двойных логарифмических координатах построить (рис. 8) обобщенные кривые « P_s-U_s » и их допускаемых значений « $[P_s]-[U_s]$ ».

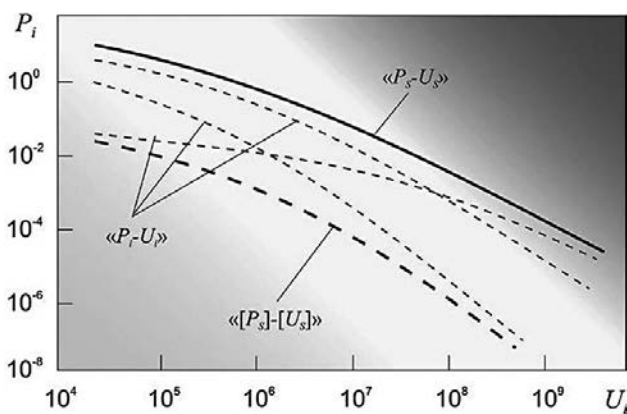


Рис. 8. Обобщенные кривые для оценки рисков по параметрам вероятностей и ущербов

Фундаментальным свойством интегральных и дифференцированных рисков является то, что росту ущербов U соответствует снижение вероятности P (частоты) их возникновения, и диапазон изменения у величины P больше, чем у величины U . Дифференцированные риски при их анализе и классификации

связываются с источниками рисков и сферами жизнедеятельности людей, функционированием объектов инфраструктуры и состояниями природной среды. Примером этому могут служить данные о параметрах вероятностей возникновения крупных чрезвычайных ситуаций на железнодорожном транспорте и сопутствующих им ущербов, приведенные на рис. 9.

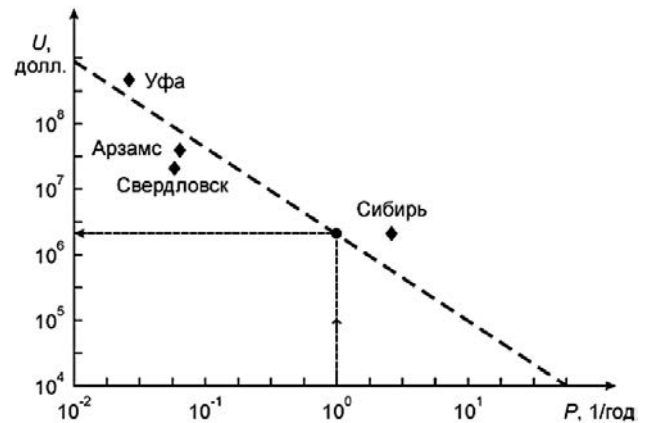


Рис. 9. Параметры вероятностей возникновения крупных чрезвычайных ситуаций на железнодорожном транспорте и сопутствующих им ущербов

Если проводить анализ рисков возникновения чрезвычайных запроектных и гипотетических ситуаций природного и техногенного характера R_s , то для вероятности реализации системных угроз можно с использованием функционала F_{PS} записать

$$P_s = F_{PS}\{P_N, P_T, P_O\}, \tag{3}$$

где P_N – вероятность возникновения неблагоприятного события, обусловленная человеческим фактором; P_T – вероятность, обусловленная состоянием объектов техносферы; P_O – вероятность, обусловленная воздействием окружающей среды.

Важное значение при этом имеет то обстоятельство, что роль человеческого фактора в оценке R_s при изменении P_N определяется не только операторами и персоналом, их профессиональными и физиологическими качествами, но и лицами, принимающими решения на всех уровнях управления функционированием инфраструктуры. Вероятности P_T существенно зависят от технического состояния и уровня защищенности от аварий и катастроф как объекта железнодорожной инфраструктуры, так и функционирующего подвижного состава. Эта защищенность определяется качеством их исходного и текущего состояния, степенью деградации на заданной стадии эксплуатации, уровнем диагностирования и мониторинга. Такое положение указывает на прямое взаимодействие параметров P_T и P_N с учетом базовых показателей надежности и безопасности объектов железнодорожной инфраструктуры и подвижного состава. Вероятности P_O зависят от проявления опасных природных процессов, а также от состояния

объектов и, следовательно, от P_T . Принятие в общем случае необоснованных (с точки зрения параметра рисков) решений о размещении опасных объектов инфраструктуры в зонах концентрированного проживания населения делает параметр P_O зависящим и от P_N .

Ущерб U_S от реализации системных угроз в целом можно выразить через функционал F_{US}

$$U_S = F_{US}\{U_N, U_T, U_O\}, \quad (4)$$

где U_N – ущербы, наносимые населению при воздействии первичных и вторичных поражающих факторов; U_T – ущербы, наносимые объектам техносферы; U_O – ущербы, наносимые окружающей среде. Как отмечалось выше, величины U_N , U_T и U_O могут измеряться как в естественных единицах (например, числом погибших людей, числом разрушенных объектов и площадью поврежденных территорий), так и в эквивалентах (например, в экономических показателях).

Таким образом, управление, регулирование и обеспечение безопасности объектов железнодорожной инфраструктуры по критериям рисков сводится к качественному и количественному статистическому и детерминированному анализу на данном отрезке времени Δt всех параметров уравнений (1)–(4) и осуществлению комплексных мероприятий по снижению этих рисков от фактических неприемлемых $R_c(t)$ до приемлемых (допустимых) уровней $[R(t)]$:

$$\begin{aligned} R(t) \leq [R(t)] &= F_R\{P(t), U(t)\} = \\ &= \frac{1}{n_R} R_c(t) = \frac{1}{n_R} F_c\{P_c, U_c\} = F_Z\{m_Z, Z(t)\}, \end{aligned} \quad (5)$$

где n_R – коэффициент безопасности (запаса) по рискам; P_c , U_c – неприемлемые (критические) вероятности и ущербы; Z – затраты на снижение рисков; m_Z – коэффициент эффективности затрат ($1 \leq m_Z \leq 10$).

Безопасность по критериям рисков может считаться обеспеченной, если будет достигнуто неравенство $n_R \geq 1$ по выражению (1). В соответствии с выражением (5) управление и планирование с использованием критериальной базы, основанной на рисках, должно сводиться к следующим основным задачам:

- развитию и использованию научных методов анализа и мониторинга рисков $R(t)$ и определяющих их основных параметров $P(t)$ и $U(t)$;
- принятию решений об уровне допускаемых величин $[R(t)]$, $[P(t)]$ и $[U(t)]$ с оценкой величин запасов n_R ;
- научно обоснованному определению уровня затрат Z на снижение рисков с выбором и повышением эффективности затрат (m_Z).

При этом прогнозирование, диагностика, мониторинг и предупреждение аварий и катастроф на объектах железнодорожной инфраструктуры и подвижного состава следует ожидать более эффективными

мероприятиями, чем ликвидация последствий ЧС [1, 6, 14–17]. Величины Z при надлежащем обосновании мероприятий по снижению рисков могут быть значительно (в m_Z раз) ниже ущербов U_S , наносимых объектам железнодорожной инфраструктуры, подвижному составу, операторам и ОАО «РЖД» в целом. Комплексное повышение безопасности объектов железнодорожной инфраструктуры и подвижного состава должно осуществляться через комплексное повышение характеристик их прочности, ресурса, надежности и живучести. Это позволит с учетом выражений (1)–(5) снизить риски $R(t)$ возникновения аварийных и катастрофических ситуаций за счет снижения вероятности $P(t)$ и ущербов $U(t)$ от этих ситуаций. При этом мониторинг и анализ $R(t)$, $P(t)$ и $U(t)$ по мере усложнения рассматриваемых объектов и систем железнодорожного транспорта и увеличения тяжести аварий и катастроф требует более глубокой проработки.

Выражение (5) свидетельствует о том, что эффективность прогнозирования и обеспечения безопасности функционирования объектов железнодорожного транспорта, проведения научных исследований и конструкторско-технологических и эксплуатационных мероприятий определяется разностью между формируемыми для них рисками $R(t)$ и приемлемыми рисками $[R(t)]$. На основе этих критериев риска должны разрабатываться конкретные мероприятия по их снижению до уровня приемлемых за счет реализации мероприятий с соответствующими затратами $Z(t)$. Такова современная экономическая и государственная политика в области обеспечения безопасности техносферы, включая железнодорожный транспорт. При этом подлежат количественному учету человеческий, природный и техногенный факторы.

Таким образом, при комплексном анализе вероятностей $P(t)$ и рисков $R(t)$ на основе выражений (1)–(5) должны фигурировать три источника возникновения аварийных и катастрофических состояний – природная среда, в которой функционируют объекты железнодорожной инфраструктуры и подвижного состава, их непосредственные технические компоненты, а также обслуживающие их операторы и персонал. При анализе рисков требуется считаться с тем, что указанные выше три источника возможного возникновения чрезвычайных ситуаций являются также объектами анализа ущербов $U(t)$, создаваемых иницирующими и поражающими факторами. Ущерб $U(t)$ и риски $R(t)$ могут создаваться для окружающей природной среды, для человека и для инженерных систем. Эти ущербы в значительной степени связаны с уязвимостью каждого из указанных элементов и при анализе условий обеспечения безопасной эксплуатации должна быть заранее задана определенная степень этой уязвимости – ката-

строфические последствия с уничтожением объектов природной среды, технических систем и людей или с нанесением им частичных повреждений.

Так как для рисков одним из базовых параметров является вероятность $P(t)$ возникновения неблагоприятных ситуаций (отказов, аварий и катастроф), то, учитывая новизну, уникальность и сложность рассматриваемой конструкции и технологии эксплуатации объектов железнодорожного транспорта в широком диапазоне сложных климатических условий нашей страны, при исходных оценках рисков можно исходить из статистических данных по аналогам эксплуатирующихся транспортных систем и проявлений природных и человеческих факторов.

Из сказанного следует, что для обеспечения безопасности функционирования объектов инфраструктуры и подвижного состава железнодорожного транспорта наряду с намеченными научными исследованиями и реализуемыми инженерно-техническими мероприятиями необходимы разработка новых методов оценки рисков с учетом технического состояния сложных инженерно-технических и природных компонентов, а также подготовка специалистов в этом направлении [15–19]. При этом в качестве базовых параметров рисков $R(t)$ могут быть выбраны интегральные экономические риски, характеризующие ущербы от потери жизни и здоровья человека (оператора, персонала, пассажиров), от разрушений и повреждений инфраструктуры и от негативных воздействий на природную среду. Описание и построение модели реальной системы штатных, нештатных, аварийных и катастрофических ситуаций с использованием концепции управления риском $R(t)$ их возникновения и развития, а также функционирующего подвижного состава, следует считать основой комплексного системного подхода к определению его исходных $R(t)$, допускаемых $[R(t)]$ и предельных (критических) $R_c(t)$ значений.

Для технических систем и их объектов, состоящих из определенного числа компонентов (агрегатов, узлов и деталей), на основе принципа декомпозиции объекта и с учетом длительного опыта их эксплуатации, анализа отказов, повреждений, разрушений, аварий и катастроф при анализе рисков через характеристики вероятности должны использоваться статистические, вероятностные и логико-вероятностные методы. Как наиболее перспективные на первом этапе для этих целей могут быть применены способы построения матриц рисков, «деревьев событий» и «деревьев отказов» по постулируемым или оцениваемым сценариям развития аварийных ситуаций. Управление, регулирование и обеспечение защищенности технических и природных систем железнодорожной инфраструктуры по критериям рисков должно сводиться к количе-

ственному статистическому и детерминированному анализу всех опасных процессов на определенном отрезке времени t , параметра вероятности $P(t)$ возникновения аварий или катастроф и математического ожидания ущерба $U(t)$ от них, а также осуществлению комплексных мероприятий по снижению рисков $R(t)$ от неприемлемых $R_c(t)$ до приемлемых (допустимых) $[R(t)]$ уровней.

Понятие безопасности применительно к критически и стратегически важным объектам железнодорожного транспорта, согласно федеральному законодательству и решениям Совета Безопасности Российской Федерации рассматривается, как свойство не наносить ущербов национальной безопасности, включая ущербы самим этим объектам, а также окружающей природной среде и людям (операторам, персоналу и населению). В качестве базового параметра безопасности в этом случае выдвигается требование по величинам интегральных экономических рисков. Эти риски подлежат прямому расчетно-экспериментальному определению и последующему их нормированию, мониторингу, регулированию и контролю. В общем случае риски тяжелых катастроф национального и регионального масштабов применительно к железнодорожной инфраструктуре должны быть увязаны с экстремальными и штатными воздействиями на все ее элементы [6, 20]:

- - опасных механических воздействий (вибрационная нагруженность, накопление эксплуатационных повреждений различного характера, в том числе усталостных, коррозионных, износных, деструкции, старения и деградации свойств конструкционных материалов);
- - опасных природных процессов (землетрясения, оползни, проникновение воды, наличие геологических разломов, радиация, низкие климатические температуры);
- - непосредственных действий человека (человеческий фактор), которые могут носить различный характер (ошибки операторов и обслуживающего персонала, умышленные несанкционированные действия, направленные на создание чрезвычайной ситуации того или иного характера, террористические и диверсионные акты).

Такой подход, основанный на системе рассмотренных выше критериев риска и его мониторинга в процессе эксплуатации, можно распространить на обеспечение безопасности и защищенности всех категорий объектов железнодорожного транспорта (ОТР, ОПО, КВО, СВО) с целью научно обоснованного обеспечения условий его безаварийной эксплуатации.

Литература

1. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Много-томное издание. Научный руководитель чл.-корр. РАН Н.А.Махутов. М.: МГОФ «Знание». Тома 1-44, 1998-2013.
2. Фортов В.Е., Махутов Н.А. Научные основы реализации приоритетных направлений Объединенного ученого совета ОАО «РЖД» в исследованиях с участием РАН. Фундаментальные исследования для долгосрочного развития железнодорожного транспорта. Сборник трудов членов и научных партнеров Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». М.: Интекст, 2013. С. 22-32.
3. Махутов Н.А. Разработка критериальной базы для оценки прочности, ресурса, живучести, хладостойкости и безопасности транспортных конструкций. Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». 2013, №3, с. 20-31.
4. Махутов Н.А. Защита объектов железнодорожного транспорта на базе оценки стратегических рисков тяжелых катастроф. Бюллетень Объединенного Ученого Совета ОАО «РЖД». 2011, №2, с. 3-8.
5. Махутов Н.А. Анализ стратегических рисков функционирования гидроэнергетических и транспортных систем. Вестник Совета Безопасности Российской Федерации. 2012, октябрь, №4 (22), с. 138-141.
6. Махутов Н.А. Прочность и безопасность: фундаментальные и прикладные исследования. – Новосибирск: Наука, 2008. – 528 с.
7. Махутов Н.А., Хоменко А.П., Гаденин М.М. Каргапольцев С.К. Оценка рисков и безопасности объектов железнодорожного транспорта (на примере Северо-Муйского тоннеля). Фундаментальные исследования для долгосрочного развития железнодорожного транспорта. Сборник трудов членов и научных партнеров Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». М.: Интекст, 2013. С. 133-157.
8. Махутов Н.А., Гаденин М.М. Анализ и обеспечение защищенности критически важных объектов ОАО «РЖД» от тяжелых аварий и катастроф. Транспорт: наука, техника, управление. 2011. № 9. С. 17-22.
9. Махутов Н.А. Критериальная база прочности, ресурса, надежности, живучести и безопасности машин и человеко-машинных комплексов. Проблемы машиностроения и надежности машин. 2013, №5, с. 25-36.
10. Гаденин М.М. Многопараметрический анализ условий безопасной эксплуатации и защищенности машин и конструкций по критериям прочности, ресурса и живучести. Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2012, № 6. С. 22-36.
11. Махутов Н.А., Гаденин М.М., Чернявский А.О. Ша-тов М.М. Анализ рисков отказов при функциони-ровании потенциально опасных объектов. Пробле-мы анализа риска. 2012, том 9, № 3. С. 8-21.
12. Гаденин М.М. Анализ условий достижения пре-дельных состояний для обеспечения условий безо-пасной эксплуатации объектов железнодорожного транспорта. Материалы Третьей научно-практиче-ской конференции «Безопасность регионов – осно-ва устойчивого развития», Иркутск, 12-15 сентября 2012 г. Иркутск: Изд-во ИрГУПС, 2009, с. 30-37.
13. Гаденин М.М. Характеристики механических свойств материалов в анализе условий достижения предельных состояний. Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012, т. 78, № 2. С. 58-63.
14. Махутов Н.А., Гаденин М.М., Р.А.Таранов. Р.А. Ана-лиз информации комплексного мониторинга для оценки состояния потенциально опасных объек-тов. Известия РАН. Серия географическая. 2010, №6, с. 88-95.
15. Махутов Н.А., Гаденин М.М. Техногенная безо-пасность: Диагностика и мониторинг состояния по-тенциально опасного оборудования и рисков его эксплуатации. Федеральный справочник: Инфор-мационно-аналитическое издание. Т.26. М.: НП «Центр стратегического партнерства», 2012. – С. 307-314.
16. Гаденин М.М. Структура многоуровневого мони-торинга параметров безопасности техносферы и окружающей среды. Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2012, № 1. С. 93-102.
17. Махутов Н.А., Гаденин М.М. Техническая диагно-стика остаточного ресурса и безопасности. Учебное пособие. Под общ. ред. В.В.Клюева. М.: Изда-тельский дом «Спектр», 2011. – 187 с. (Серия «Диагно-стика безопасности»).
18. Махутов Н.А., Гаденин М.М. Научные исследова-ния и подготовка специалистов по обеспечению защищенности критически важных объектов. Ма-шиностроение и инженерное образование. 2004, № 1, с. 19-32
19. Махутов Н.А., Абросимов Н.В., Гаденин М.М.. Оче-щение безопасности – приоритетное направ-ление в области фундаментальных и прикладных исследований. Экономические и социальные пере-мены: факты, тенденции, прогноз. 2013, № 3 (27). С. 46-71.
20. Гаденин М.М. Оценка влияния режимов нагруже-ния на условия достижения предельных состояний и назначение запасов. Заводская лаборатория. Диа-гностика материалов. 2013, т. 79, № 10. С. 65-70.

Кибзун А.И., Игнатов А.Н., Платонов Е.Н., МАИ (НИУ), г. Москва

Методология оценки и минимизации рисков на железнодорожном транспорте.

Существует множество различных видов транспортных происшествий: аварии, сходы с рельсов, крушения поездов и другие. Однако помимо этих крупных транспортных происшествий такие события, как ограничение скорости на участке, закрытие железнодорожного полотна на ремонт также ведут к убыткам. Если крупные транспортные происшествия встречаются довольно редко, то отказы можно встретить довольно часто. Однако и ущерб от отказов намного меньше, поэтому, чтобы сравнивать реальные убытки, вводят риск транспортного происшествия [1].

Как известно из [1], риск транспортного происшествия определяется с помощью формулы

$$R(B) = F_R(P(B), L(B)),$$

где $P(B)$ – вероятность транспортного происшествия, $L(B)$ – ущерб от этого происшествия, а F_R – некий функционал, связывающий вероятность и ущерб.

Как отмечено в [2], а также следует из отчетных статистических данных, возникновение нарушений безопасности движения на железнодорожном транспорте связано с наличием целого ряда факторов, влияющих как на само транспортное происшествие, так и на тяжесть его последствий. Поэтому анализ величины $R(B)$ следует проводить с учетом этих факторов. В качестве факторов, приводящих к транспортному происшествию, выделяют погодные факторы, состояние дорожного полотна, человеческий фактор и другие [3].

К оценке величины риска $R(B)$ может быть применено несколько подходов. Первый заключается в том, чтобы анализировать условную вероятность возникновения транспортных происшествий в зависимости от различных комбинаций факторов, то есть

$$P(B) = P(B, F_1, \dots, F_m),$$

где F_1, \dots, F_m – факторы, приводящие к транспортным происшествиям. Второй подход заключается в использовании диаграмм риска [4] – графиков в плоскости (L, P) , по которым можно сделать вывод: принимать ли экстренные меры по исправлению транспортной ситуации или же вообще ничего не делать. Существенным отличием первого подхода от второго является то, что при использовании диаграмм риска помимо оценки вероятности транспортного происшествия, приходится еще и оценивать каким-то образом ущерб, а не делать заключение об опасности текущей ситуации на железной дороге только на основе вероятности.

К вопросу оценки ущерба от транспортного происшествия также применимо несколько подходов [5]. Например, можно использовать регрессионные модели. Однако, учитывая, что число наблюдений конечно, задача восстановления функции $L(B) = L(B, F_1, \dots, F_m)$, где F_1, \dots, F_m – факторы, приводящие к транспортным происшествиям, представляется практически неразрешимой. В то же время обычно предполагают, что функция $L(B, F_1, \dots, F_m)$ является линейной по переменным F_1, \dots, F_m , то есть имеет вид

$$L(B, F_1, \dots, F_m) = \theta_0 + \theta_1 F_1 + \dots + \theta_m F_m, \dots$$

где неизвестные параметры θ_i оцениваются, например, при помощи метода наименьших квадратов. Также часто используются различные нелинейные модели. Помимо регрессионных моделей для оценивания ущерба прибегают к поиску непараметрической оценки плотности. Оценка плотности находится по формуле

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{L_i - x}{h}\right),$$

где L_i – наблюдение за случайной величиной ущерба $L(B)$, n – размер выборки, h – ширина окна, $K(z)$ – ядерная функция. Построив функцию $\hat{f}(x)$, можно смоделировать значение ущерба в каждый конкретный момент времени.

В то же время, если совместное появление факторов и происшествий может быть оценено на основе протоколов происшествий, то условные вероятности происшествий при появлении факторов могут быть оценены только на основе вероятности появления факторов, так как

$$P(B | F_i = f_j^i) = \frac{P(\{B, F_i = f_j^i\})}{P(F_i = f_j^i)},$$

где $P(F_i = f_j^i)$ – вероятность того, что фактор F_i принял значение f_j^i , $P(\{B, F_i = f_j^i\})$ – вероятность совместного появления транспортного происшествия B и того, что фактор F_i принял значение f_j^i . Вероятности же появления факторов не могут быть оценены в принципе на основе только протоколов происшествий. Поэтому актуальной является организация мониторинга за появлением факторов. Если же выборка маленькая, то следует использовать логистическую схему обработки данных. Приведем алгоритм поиска оценки вероятности появления какого-то значения набора факторов F_1, \dots, F_m для малой выборки по этой схеме. Решим систему нелинейных уравнений:

$$\sum_{j=1}^n \left(y_j - \frac{\exp(b^T f_j)}{1 + \exp(b^T f_j)} \right) f_j = 0,$$

где вектор $b \in \mathbb{R}^m$, f_j – вектор реализаций факторов F_1, \dots, F_m , y_j – величина, принимающая значение 0 или 1 в зависимости от того, произошло в j наблюдении происшествие B или нет. Если решением этой системы является вектор \hat{b} , то $P(B|F=f_{\text{тек}}) \approx \Lambda(\hat{b}^T f_{\text{тек}})$,

где

$$\Lambda(x) = \frac{\exp(x)}{1 + \exp(x)},$$

$f_{\text{тек}}$ – текущее состояние факторов.

На организацию мониторинга могут потребоваться значительные финансовые средства. Следовательно, необходимо сопоставить средства, затрачиваемые на мониторинг, со средними потерями при происшествии [6]. Пусть на транспортное происшествие B влияет только один фактор F_1 со значениями $f_1^1 < f_2^1 < \dots < f_N^1$. Пусть также $P(B|F_1 = f_k^1)$ монотонно возрастает по $k=1 \dots N$, а c – средняя величина ущерба от возникновения транспортного происшествия B . Рассмотрим стратегию минимизации влияния случайного фактора (приведения его значения к уровню f_1^1) на транспортное происшествие. Расходы при такой стратегии состоят из трех компонент

$$\Phi = c_E + C_F + C_B,$$

где c_E – детерминированная величина, характеризующая затраты на установку и эксплуатацию оборудования, C_F – случайная величина, характеризующая затраты на изменение значения фактора F_1 , C_B – случайная величина, характеризующая затраты, связанные с возможным ущербом при происшествии B после проведения профилактики. Затраты C_F могут быть представлены в виде дискретной случайной величины с рядом распределения.

C_F	c_1	C_2	...	c_N
P	p_1	p_2	...	p_N

Затраты C_B на возможный ущерб при осуществлении события B после профилактики могут быть представлены в виде следующего ряда распределения.

C_B	c	0
P	$P_1(B)$	$1 - P_1(B)$

$P_1(B) = P(B|F_1 = f_1^1)$ – вероятность наступления события B после приведения фактора F_1 к уровню f_1^1 . Тогда величина средних потерь для системы с мониторингом и профилактикой составит

$$\bar{\Phi} = M[\Phi] = c_E + \sum_{k=1}^N c_k p_k + c P_1(B),$$

где $M[\Phi]$ – математическое ожидание величины расходов.

Величина средних потерь (риск происшествия) для системы без мониторинга в силу формулы полной вероятности

$$\bar{L} = cP(B) = c \sum_{k=1}^N P(B|F_1 = f_k^1) p_k.$$

В случае, если $\bar{\Phi} \leq \bar{L}$, можно считать, что система мониторинга с профилактикой будет полезной. В противном случае, использование системы мониторинга следует признать нецелесообразной. Однако не всегда имеет смысл приводить фактор F_1 к уровню f_1^1 , так как это может быть очень дорого. Можно также приводить F_1 к любому желаемому уровню f_k^1 , $j = 2 \dots N$ [6].

С учетом сказанного выше опишем рекомендуемую последовательность действий при проведении мониторинга, профилактики и оценки риска.

1. Устанавливаются датчики для измерения частоты появления фактора F .
2. Вычисляется оценка вероятности появления i -го значения фактора F .
3. Найденная оценка уточняется на основе логистической схемы обработки данных по малой выборке.
4. Обрабатываются протоколы происшествий, по которым оцениваются вероятности одновременного появления транспортного происшествия и фактора F .
5. Вычисляется условная вероятность наступления транспортного происшествия при условии, что фактор F принял i -ое значение.
6. Находится ряд распределения случайных затрат на проведение мониторинга и профилактики, направленной на приведение фактора F к некоторому желаемому значению.
7. Определяется оптимальное значение фактора, к которому необходимо привести фактор F .
8. Задается уровень средних условных потерь, решается задача и выбирается оптимальное значение надежности принятия решения о проведении профилактики.
9. Принимается решение о необходимости установки оборудования по проведению мониторингу, и проводятся необходимые действия по профилактике, если это возможно. В ином случае система с профилактикой и мониторингом признается неэффективной, и никаких дальнейших действий не производится.
10. Определяется необходимость проведения профилактики, в зависимости от решения вспомогательной задачи.
11. Вычисляется экономический эффект от системы мониторинга с профилактикой.

В то же время факторы опасности и сами транспортные происшествия локально привязаны ко времени и месту их появления [7]. Поэтому в качестве критерия, который позволяет сравнивать опасности возникновения транспортных происшествий на участках железнодорожного пути различных протяженностей и за различное время, также можно использовать вероятность транспортного происшествия на отрезке пути в 1 км и за время в один год. Вероятность, что на участке с единичной длиной и единичным временем произойдет хотя бы одно транспортное происшествие при интенсивности движения i_2 , составляет

$$P(N(B) \geq 1 | t, l, i = i_2) = 1 - \exp(-\lambda),$$

где $\lambda = \frac{n}{lt}$, n – количество транспортных происшествий, зарегистрированных за время t на участке протяженностью l . Отношение вероятностей для различных интенсивностей движения имеет вид

$$\frac{P(N(B) \geq 1 | t, l, i = i_2)}{P(N(B) \geq 1 | t, l, i = i_1)} \approx \frac{i_2}{i_1}.$$

Таким образом, вычислив вероятности, стоящие в левой части последней формулы, получим соотношение: во сколько раз следует уменьшить интенсивность движения поездов для того, чтобы добиться приемлемого уровня вероятности.

Литература

1. ГОСТ Р 54505-2011. Безопасность функциональная. Управление рисками на железнодорожном транспорте.
2. Розенберг Е.Н., Замышляев А.М., Прошин Г.Б. Определение опасности возникновения транспортных происшествий и событий на основе контроля состояния факторов, влияющих на их возникновение // *Надежность*, 2009, № 3 (31), с. 37–50.
3. Замышляев А.М., Кан Ю.С., Кибзун А.И., Шубинский И.Б. Статистическая оценка опасности возникновения происшествий на железнодорожном транспорте // *Надежность*, 2012, № 2 (41), с. 104–117.
4. Кибзун А.И., Игнатов А.Н. Методика организации профилактики транспортного происшествия // Труды второй научно-технической конференции «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте», 2013, с. 177–179.
5. Горяинов А.В., Замышляев А.М., Платонов Е.Н. Анализ влияния факторов на ущерб от происшествий на транспорте с помощью регрессионных моделей // *Надежность*, 2013, № 2 (45), с. 126–135.
6. Кибзун А.И., Игнатов А.Н. Организация мониторинга и оптимальной профилактики по предупреждению транспортного происшествия на заданном уровне надежности // *Надежность*, 2013, №4 (47), с. 137–149.
7. Кан Ю.С., Реушкин В.В. Информационная технология анализа безопасности движения на железнодорожном транспорте. // *Вестник компьютерных и информационных технологий*, 2014, №7, с. 3–7.

Горелик А.В., Веселова А.С., Журавлев И.А., ОАО «НИИАС», г. Москва

Модель оценки функциональной надежности объектов транспортной инфраструктуры

В настоящее время оценка экономических ресурсов и рисков, связанных с внезапными отказами объектов транспортной инфраструктуры, осуществляется преимущественно детерминировано, без учёта в полном объёме характеристик изучаемых систем, условий и режимов их функционирования, обслуживания и ремонта.

Известен основанный на теории случайных импульсных потоков подход к оценке рисков, связанных с безопасностью, использованный применительно к системам железнодорожной автоматики и телемеханики на железнодорожных переездах [1-3], а также на переходах через железнодорожные пути [8]. В частности, случайный поток потенциально опасных отказов объекта транспортной инфраструктуры можно представить как импульсный, если в качестве длительности случайных импульсов рассматривать случайное время обнаружения и предотвращения опасного отказа. Согласно модели, предложенной Г.В. Дружининым в соответствии с [7], процессы появления и действия дестабилизирующих факторов можно представить в виде стационарных случайных потоков взаимно не перекрывающихся во времени импульсов (рис.1).

В общем случае имеем случайный поток $X(U)$, задаваемый плотностью распределения вероятностей моментов времени появления, длительности и амплитуд импульсов $f(U_1, U_2, U_p, \dots, U_m, \Delta U_1, \Delta U_2, \Delta U_p, \dots, \Delta U_m, h_1, h_2, h_p, \dots, h_m)$.

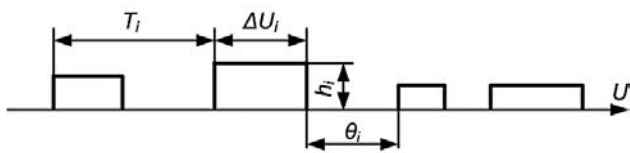


Рис.1.

При стационарном потоке взаимно не перекрывающихся импульсов вероятность того, что произвольно взятый момент времени окажется под действием поражающего фактора, при $U \rightarrow \infty$ определяется по формуле

$$\rho = \frac{\Delta \bar{U}}{t} \quad \text{или} \quad \rho = \mu \cdot \Delta \bar{U},$$

где μ – интенсивность проявления фактора:

$$\mu = \frac{1}{t} = \frac{1}{\Delta \bar{U} + \Theta}.$$

Рассмотрим модель совпадения импульсных потоков потенциально опасных отказов систем обеспечения движения поездов и активных состояний этих систем относительно движения поезда (рис. 2).

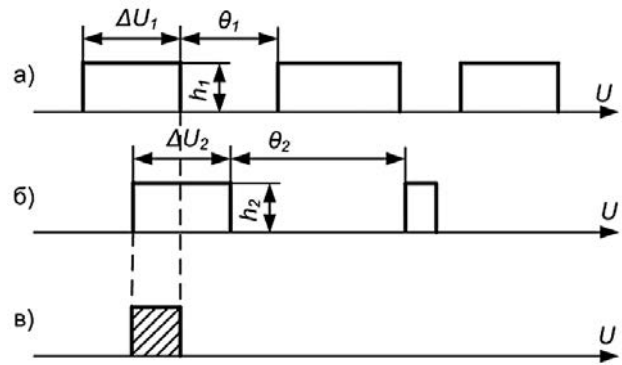


Рис.2.

Если ΔU_1 и ΔU_2 перекрываются хотя бы частично, то образуется поток импульсов совпадения, которые соответствуют потоку аварийных последствий, то есть переходу движения в опасное состояние S под действием опасного дестабилизирующего фактора F за расчетное время T .

В теории импульсных потоков показывается [7]:

$$\mu_{12} = \frac{\Delta \bar{U}_1 + \Delta \bar{U}_2}{(\Delta \bar{U}_1 + \Theta_1)(\Delta \bar{U}_2 + \Theta_2)},$$

где m_{12} – интенсивность потока аварийных последствий.

Модель импульсных случайных потоков может быть эффективно применена для вероятностной оценки результатов функционирования объектов транспортной инфраструктуры в части вероятности возникновения экономических издержек вследствие различных внезапных отказов. В отличие от известного, ранее применявшегося подхода, основанного на использовании для оценки экономических издержек и планируемых ресурсов теории массового обслуживания в части марковских процессов [4-6], предлагаемый подход позволяет:

- моделировать функционирование объекта транспортной инфраструктуры при входных случайных потоках, распределённых в соответствии с различными вероятностными законами;
- описывать события, связанные с функционированием объекта транспортной инфраструктуры не точно, а в виде случайных импульсов ненулевой случайной длительности и амплитуды;
- при расчете экономических затрат учесть различные вероятности появления случайных импульсов

различной длительности в результирующем потоке событий, то есть оценить риски возникновения издержек;

- учесть различия в величине удельных издержек, связанных с устранением различных видов внезапных отказов, для поездов различных категорий путем задания различной амплитуды случайных импульсов.

Для оценки надёжности и эффективности функционирования объектов транспортной инфраструктуры предлагаются следующие модели и методы:

1. Предлагается объединить в рамках одной модели два разных по природе процесса: процесс применения объекта транспортной инфраструктуры по назначению, представляющий, по сути, чередующиеся случайные интервалы занятости и свободности объекта, и процесс случайных переходов объекта из работоспособных состояний в неработоспособные (отказов) и обратно (восстановлений), с целью выделения результирующего процесса, позволяющего определить частоту и длительность событий, заключающихся в одновременном нахождении объекта в состоянии отказа и необходимости использования его по назначению.
2. На основе зависимости экономических потерь, связанных с невыполнением технологического процесса из-за отказов технических средств (например, остановки и простоя поездов) в единицу времени и распределения длительности и частоты отказов технических средств, можно определить суммарные издержки за расчетный интервал времени.

Для решения каждой из задач предлагается две модели:

- модель потока случайных импульсов совпадения;
- модель зависимости средней частоты случайных импульсов совпадения от их длительности и формирования суммарных экономических издержек.

Модель случайного потока импульсов совпадения представлена на рис.3.

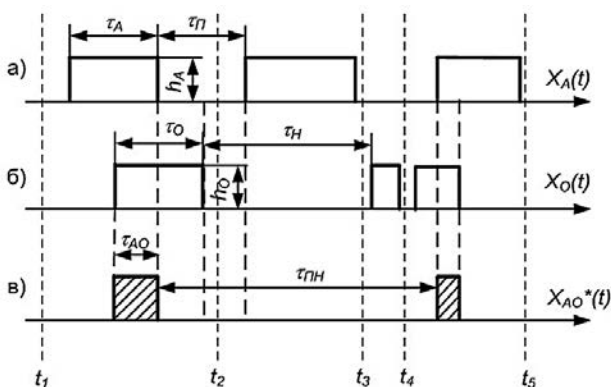


Рис.3.

Предлагаемая модель состоит из следующих элементов:

- Случайный поток импульсов, связанный с использованием транспортной инфраструктуры для передвижения подвижной единицы $X_A(t)$. Наличие импульса соответствует использованию объекта транспортной инфраструктуры по назначению (например, интервал времени замкнутого состояния поездного маршрута на станции), а отсутствию – свободное состояние (например, период предварительно замкнутого, незамкнутого и незанятого состояния поездного маршрута на станции).
- Случайный поток импульсов, связанных с отказами и восстановлениями объекта транспортной инфраструктуры $X_O(t)$. Импульсу в потоке соответствует неработоспособное состояние (состояние отказа), а интервалу – работоспособное состояние.
- Результирующий случайный поток импульсов совпадения $X_{AO}(t)$, импульсы которого представляют собой события, заключающиеся в одновременном нахождении объекта транспортной инфраструктуры в состоянии отказа и необходимости его использования по назначению. Длительность каждого импульса совпадения представляет собой реализацию длительности задержки подвижной единицы в результате единичного отказа и последующего за ним восстановления. Характеристики этого потока определяют издержки, обусловленные незапланированными остановками и простоем подвижных единиц.

Каждому исходному потоку случайных импульсов соответствуют свои характеристики, определяемые статистически, а именно:

- математические ожидания: $\bar{\tau}_A$ – длительности занятия объекта транспортной инфраструктуры подвижным составом; $\bar{\tau}_f$ – длительности свободного (не занятого) состояния объекта транспортной инфраструктуры; $\bar{\tau}_o$ – длительности отказа объекта транспортной инфраструктуры на участке; $\bar{\tau}_H$ – длительности работоспособного состояния объекта транспортной инфраструктуры на участке.
- плотности распределений: $\alpha_A(\tau)$ – длительности занятого состояния объекта транспортной инфраструктуры; $\beta_H(\tau)$ – длительности свободного состояния объекта транспортной инфраструктуры; $\alpha_o(\tau)$ – длительности состояния отказа объекта транспортной инфраструктуры; $\beta_H(\tau)$ – длительности работоспособного состояния объекта транспортной инфраструктуры.

На основе теории случайных импульсных потоков [7] с использованием представленных исходных данных могут быть вычислены и построены: зависимость средней частоты импульсов потока совпадения от их

длительности $\mu_{AO}(\delta)$, плотность вероятности распределения длительности импульсов потока совпадения, а из последней определена вероятность импульсов различной длительности $P_{AO}(\delta)$. Фактически величина $\mu_{AO}(\delta)$ для объекта транспортной инфраструктуры соответствует частоте незапланированных остановок транспорта длительностью δ в заданных условиях.

В общем случае экономические потери, связанные с отказами, могут быть заданы с помощью случайных величин – высоты импульсов и, как следствие, – площади импульсов потока совпадений. Кроме того, полученные результаты могут являться исходными данными для построения второй модели – модели зависимости средней частоты случайных импульсов совпадения от их длительности и формирования суммарных экономических издержек. Модель представлена на рис.4. Она реализуется в трехмерном пространстве.

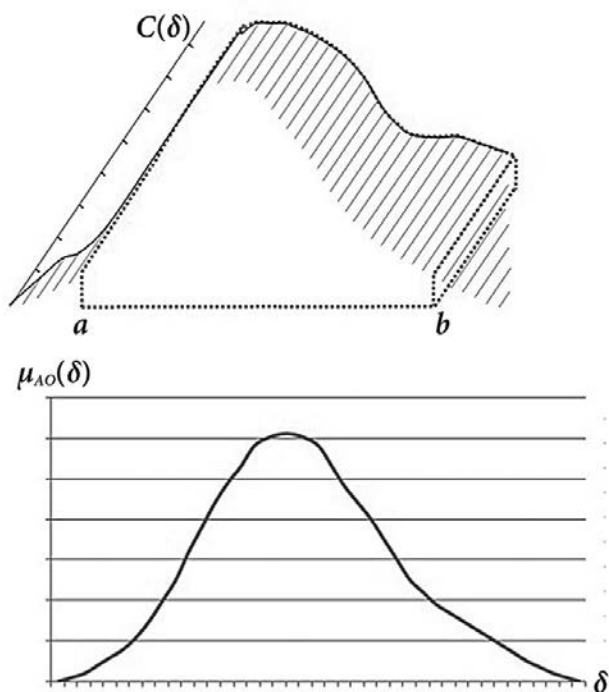


Рис.4.

Сначала в осях $\mu'_{AO}(\delta)$ и δ изображается полученная на основе зависимости средней частоты незапланированных остановок подвижных единиц от времени простоя функция плотности вероятности времени простоя поездов (изображена толстой линией). Площадь фигуры, образуемой кривой и осью абсцисс, равна единице, так как характеризует вероятность достоверного события.

Затем в осях $C(\delta)$ и δ в масштабе откладываются удельные издержки, связанные с незапланированной стоянкой поезда длительностью δ . В последнюю очередь по полученным проекциям достраивается объемная фигура.

Для оценки значения суммарных издержек с заданной доверительной вероятностью на основе данной модели необходимо:

Определить интервал $[a, b]$, которому соответствует такая же площадь фигуры, полученной между осью абсцисс и функцией плотности вероятности, что и искомое значение доверительной вероятности результата.

Из точек a и b провести вертикальные и горизонтальные линии, перпендикулярные оси абсцисс, а затем достроить ограничивающие исходную объемную фигуру вертикальные плоскости.

Объем фигуры, полученной в результате усечения исходной объемной фигуры указанными вертикальными плоскостями, умноженный на суммарную частоту импульсов совпадения и длительность расчетного интервала времени, соответствует величине суммарных издержек, обусловленных незапланированными остановками транспорта вследствие внезапных отказов изучаемого объекта транспортной инфраструктуры в конкретных условиях эксплуатации и ремонта.

Предложенные модели позволяют решать следующие задачи:

1. Математически описывать механизм формирования возникающих при различных условиях эксплуатации объектов транспортной инфраструктуры экономических издержек, связанных с возникновением внезапных и постепенных отказов этих объектов, различными распределениями случайной величины времени восстановления.
2. Осуществить количественный и качественный анализ экономических потерь от различных факторов, обусловленных характеристиками надёжности и условиями эксплуатации объектов транспортной инфраструктуры.
3. Задавать в качестве исходных данных различные комбинации параметров, включая:
 - закон распределения наработки объекта транспортной инфраструктуры на отказ;
 - закон распределения времени до восстановления объекта транспортной инфраструктуры после отказа;
 - закон распределения времени свободного состояния объекта транспортной инфраструктуры;
 - закон распределения длительности использования объекта транспортной инфраструктуры по назначению;
 - количественные характеристики случайных величин, характеризующих наработку объекта транспортной инфраструктуры на отказ, время до его восстановления, длительности свободного состояния и состояния использования по назначению, включая первый и второй вероятностные моменты;

- вид закона изменения удельных издержек от времени незапланированного простоя транспорта вследствие внезапного отказа объекта транспортной инфраструктуры;
- величину удельных издержек от незапланированного простоя для грузовых и пассажирских поездов;
- допустимое значение интенсивности отказов объектов транспортной инфраструктуры;
- доверительную вероятность оценки экономических потерь, связанных с эксплуатацией объекта транспортной инфраструктуры в течение расчетного интервала времени;
- проводить комплексный анализ с помощью предложенных моделей и получать различные управленческие решения, в том числе минимизирующие стоимость жизненного цикла объекта транспортной инфраструктуры в конкретных условиях эксплуатации и ремонта.

Предлагаемый подход дает возможность рассматривать технические и экономические показатели функционирования изучаемых объектов в неразрывной связи, с учетом режима работы, условий эксплуатации и характеристик процесса их обслуживания.

Литература

1. Горелик А.В., Неваров П.А., Тарадин Н.А. Модель оценки безопасности систем железнодорожной автоматики по параметрам движения поездов // НТТ - наука и техника транспорта. – 2008. – №4.
2. Тарадин Н.А. Сравнительная оценка безопасности функционирования железнодорожных поездов // НТТ - наука и техника транспорта. – 2009. – №4.
3. Горелик А.В., Журавлев И.А., Тарадин Н.А. Методы анализа безопасности функционирования систем железнодорожной автоматики и телемеханики // Надёжность. – 2011. – №1.
4. Безродный Б.Ф., Горелик А.В., Неваров П.А., Шалягин Д.В. Принципы управления надёжностью систем ЖАТ // Автоматика, связь, информатика. – 2008. – №7.
5. Безродный Б.Ф., Горелик А.В., Журавлев И.А., Неваров П.А., Шалягин Д.В. Управление надёжностью функционирования систем железнодорожной автоматики и телемеханики по экономическому критерию // Экономика железных дорог. 2011. № 3.
6. Горелик А.В., Неваров П.А., Журавлев И.А., Тарадин Н.А. Методы анализа надёжности и эффективности функционирования систем железнодорожной автоматики и телемеханики. НТТ – Наука и техника транспорта. 2011. № 3.
7. Седакин Н.М. Элементы теории случайных импульсных потоков. – М.: Сов. радио, 1965.
8. Замышляев А.М. Автоматизация процессов комплексного управления техническим содержанием инфраструктуры железнодорожного транспорта: дис. канд. техн. наук: 05.13.06 – Москва: МИИТ, 2013.

Язенин А.В., Гришина Е.Н., Рыжова М.Н., Солдатенко И.С., Сорокин С.В., ТвГУ, г. Тверь
 Иванова Е.И., Судаков А.Г., Ханьгин М.А., Михайлов В.В., ОАО «ТВЗ», г. Тверь

Интеллектуальная система диагностики и прогнозирования состояния вагонного электрооборудования методами Дата Майнинга.

Введение

В соответствии со «Стратегией развития железнодорожного машиностроения до 2030 года» железнодорожное машиностроение на сегодняшний день имеет большие возможности и перспективы развития [4]. В рамках данной стратегии особое внимание уделяется пассажирскому вагоностроению, производящему один из наиболее безопасных видов транспорта.

Одной из основных задач, поставленных владельцем значительной части подвижного состава и важнейшим оператором сети российских железных дорог – ОАО «РЖД», – является обеспечение и повышение уровня безопасности железнодорожного транспорта, который достигается не только путем обновления парка подвижного состава, но и посредством разработки и создания комплексных систем диагностики и анализа, внедряемых с целью выявления и прогнозирования технического состояния инфраструктуры подвижного состава.

Современный железнодорожный транспорт комплектуется электрооборудованием, которое позволяет выполнять мониторинг текущего состояния оборудования вагона, а также предотвращать возникновение неисправностей вагонного электрооборудования.

Темой исследования является интеллектуальная система диагностики состояния подвижного состава. Основное направление исследования – разработка и применение методов и алгоритмов обработки информации, поступающей с пространственно-распределенного бортового и стационарного программно-аппаратного оборудования, установленного на подвижном составе. Результатом исследований является интеллектуальная система, позволяющая решать задачи диагностики и прогнозирования поведения вагонного оборудования на железнодорожном транспорте на основе применения методов интеллектуального анализа данных.

В статье отражены основные научные результаты, полученные коллективом исполнителей, в рамках исследований по проекту РФФИ «Интеллектуальная информационная система единого центра обработки данных ОАО «РЖД» для решения задач диагностики и прогнозирования внештатных ситуаций поведения вагонного оборудования подвижных составов на железнодорожном транспорте», проект №13-07-13160-офи_м_РЖД.

В статье представлена модель интеллектуальной системы диагностики состояния подвижного состава, описаны модули системы, а также рассмотрены подходы к решению задачи сокращения пространства признаков.

Модель интеллектуальной системы диагностики состояния подвижного состава

В связи с внедрением на серийную продукцию ОАО «ТВЗ» специализированного комплекта электрооборудования, появляется возможность анализировать и диагностировать состояние вагонного оборудования, а также прогнозировать, и, следовательно, предотвращать возникновение нештатной ситуации на вагоне. Базу данных о состоянии электрооборудования вагона образуют временные срезы значений параметров контроллера управления электрооборудованием вагона (КУЭВ), предназначенного для приема сигналов с вагонного электрооборудования. КУЭВ входит в состав системы контроля, диагностики и управления вагоном (СКДУ). СКДУ является одной из подсистем информационной системы железнодорожного транспорта и представляет собой сложноорганизованную модульную систему.

Во время своей работы СКДУ ведет запись параметров системы, определяемых в КУЭВ, которая осуществляется через фиксированный временной интервал (рис. 1). Срез представляет собой набор значений параметров системы, измеренных в некоторый момент времени и расположенных в определенном порядке. СКДУ также ведет журнал событий, которые появляются асинхронно в случае возникновения ошибок и неисправностей в системе [3].

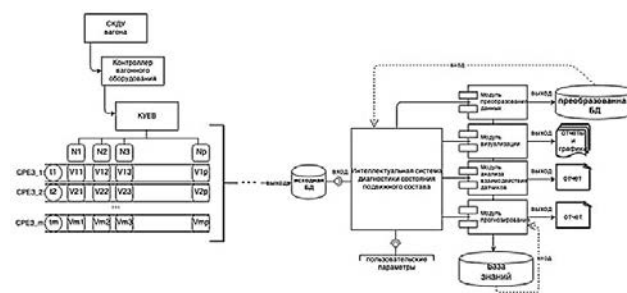


Рис. 1. Модель информационной системы диагностики состояния подвижного состава

Интеллектуальная система диагностики состояния подвижного состава позволяет проводить анализ физических характеристик вагона и неисправностей, возникающих в системе, на основе информации, получаемой из базы данных, формируемой СКДУ.

Разработанная система имеет модульную структуру, что способствует минимизации числа межмодульных связей и, следовательно, уменьшению сложности разрабатываемого программного комплекса, а также делает систему гибкой к возможной модернизации и расширению функционала (рис.1).

В состав разработанной системы входят следующие модули: модуль преобразования данных, модуль визуализации, модуль анализа взаимодействия датчиков, модуль прогнозирования.

«Модуль преобразования данных» осуществляет модификацию базы данных к удобному для дальнейшей работы виду и преобразует исходную информацию, хранимую в базе, к модели временного ряда для последующего применения методов Дата Майнинга временных рядов.

«Модуль визуализации данных» предназначен для отображения информации, получаемой от датчиков вагонного оборудования, а также информации, поступающей от других модулей системы, в удобной и наглядной форме. В данном модуле реализована возможность настройки режимов отображения выбранных данных путем спецификации параметров, задаваемых пользователем. На рис. 2 представлены примеры отчетов, сформированных в «модуле визуализации».

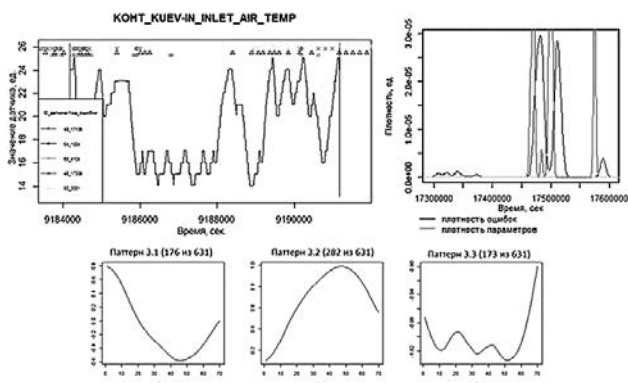


Рис. 2. Примеры графического представления данных в «модуле визуализации» системы

«Модуль анализа взаимодействия датчиков» предназначен для анализа информации, поступающей с датчиков электрооборудования вагона. В рамках решаемой задачи прогнозирования возникновения неисправностей вагонного оборудования возникает проблема оперирования данными большой размерности, так как количество датчиков, генерирующих сигналы, достаточно велико, что может не позволить осуществлять эффективный интеллектуальный анализ данных с целью оперативного принятия решений в случае возникновения чрезвычайных ситуаций на вагоне [2].

В этом случае целесообразно проанализировать всю совокупность имеющихся временных рядов для оценки связи между ними. Реализованный в рамках данного

модуля подход к анализу данных направлен на выявление скрытых зависимостей между датчиками устройств на основе расчета меры ассоциации между временными рядами, что дает возможность для решения задачи сокращения размерности исходных данных, поступающих с датчиков электрооборудования вагона.

«Модуль прогнозирования» использует информацию, полученную в результате работы системы. На основе анализа данной информации осуществляется прогноз возникновения неисправностей электрооборудования вагона и может быть принято решение о возможности дальнейшей эксплуатации вагонного оборудования. В «Модуле прогнозирования» реализован ряд подходов к анализу данных о состоянии электрооборудования вагона.

Одним из реализованных в рамках описываемого модуля подходов к выявлению зависимостей в темпоральных данных является построение ассоциативных правил временных рядов, основанное на обнаружении и последующей оценке локальных паттернов временных рядов. Извлечение паттернов временных рядов является нетривиальной задачей. Рассматриваемый подход отличается от традиционных методов анализа, которые направлены на построение глобальных моделей. В рамках реализованного подхода осуществляется кластеризация подпоследовательностей временного ряда и формирование ряда подпоследовательностей путем скольжения окном заданного размера по исходному ряду.

В контексте рассматриваемой задачи прогнозирования неисправностей осуществляется построение правил следующего вида:

Если имеем паттерн A_i рассматриваемого ряда значений датчика, то неисправность устройства B произойдет в течение времени T .

Здесь неисправность устройства B характеризуется дискретным временным рядом. Описанное выше правило позволяет отследить «деструктивное» поведение временного ряда значений датчика (паттерн поведения или локальный тренд), которое приведет к возникновению ошибки на вагоне в течение некоторого времени T .

Результаты работы всех модулей системы формируют базу знаний, содержащую структурированную информацию о состоянии электрооборудования вагона, используемую для дальнейшего анализа системой и/или человеком.

Численный эксперимент

В рамках проведенного численного эксперимента в качестве исходных данных было рассмотрено 700 измерений, полученных с 11 датчиков устройства типа КОНТ-КУЕВ. После проведения соответствующих первоначальных преобразований с помощью «Модуля преобразования данных» на основе разработанного подхода осуществлен расчет парных ассоциаций меж-

ду временными рядами [1] с использованием меры ассоциации для групп окон различной длины («Модуль анализа взаимодействия датчиков», рис. 3).

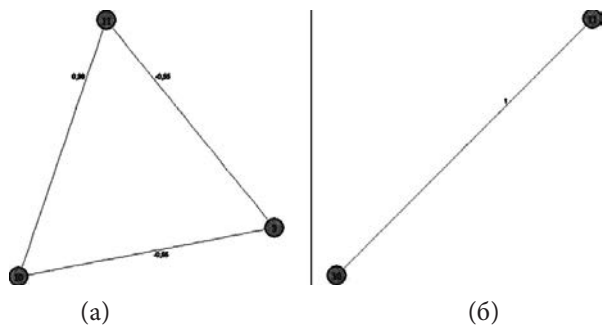


Рис. 3. Результаты расчетов меры ассоциации на уровне выше 0,5 для (а) окон длины 2÷3, (б) окон длины 2÷10

При расчете меры ассоциации для окон длины 2÷3 (рис. 3а) было выявлено наличие связи между временными рядами V3 и V10, V3 и V11, V10 и V11. Однако связей между временными рядами V3 и V10, V3 и V11 не было выявлено при расчете меры ассоциации для окон большей длины (рис. 3б).

Наряду с возможностью расчета меры ассоциации в «Модуле анализа взаимодействия датчиков» реализована возможность проведения корреляционного анализа (на основе расчета коэффициента Пирсона).

В результате расчета значений парной корреляции временных рядов датчиков устройства КОИТ-KUEV были выявлены зависимости между рядами V1 и V5, V1 и V9, V2 и V10, V2 и V11, V3 и V5, V3 и V9, V4 и V9, V5 и V9, V7 и V8, V8 и V10, V8 и V11, V10 и V11 (на уровне значения коэффициента корреляции больше 0,5).

Результаты численного эксперимента показали, что стабильной сильной связью является связь между датчиками устройства КОИТ-KUEV вагона, представленными временными рядами V10 и V11, что позволяет сделать вывод о схожем поведении данных датчиков.

На основе полученной информации в рамках дальнейшей работы системы, в частности, при решении задачи прогнозирования поведения электрооборудования вагона, будет выбран только один из указанных датчиков.

Заключение

В настоящее время реализована интеллектуальная модель диагностики возникновения неисправностей на подвижном составе. Архитектура разработанной системы делает систему гибкой к возможной модернизации и расширению функционала. Система предоставляет возможность осуществлять комплексный анализ информации, поступающей с вагонного оборудования, и содержит следующий функционал:

- преобразование данных к удобному для анализа виду;
- анализ взаимодействия датчиков вагонного оборудования на основе расчета меры ассоциации временных рядов и проведения корреляционного анализа;

- прогнозирование возникновения неисправностей вагонного оборудования методами Дата Майнинга временных рядов, в том числе, посредством построения ассоциативных правил;
- графическое представление результатов работы модулей в удобной и наглядной форме;
- формирование пользовательских отчетов по результатам работы всех модулей системы;
- формирование базы знаний на основе полученных результатов.

Применение методов Дата Майнинга к данным, характеризующим состояние подвижного состава, представляется эффективным при решении задачи диагностики состояния устройств вагона с целью обеспечения должного уровня безопасности на железнодорожном транспорте.

Основанием использования методов Дата Майнинга для анализа информации, поступающей с вагонного оборудования, является физический механизм взаимодействия устройств вагона и контроллера управления электрооборудованием вагона, а также взаимодействие датчиков устройств с внешней средой.

В плане дальнейшего развития системы представляется целесообразным расширение модуля прогнозирования методами перцептивного Дата Майнинга, что позволит работать с нечеткой информацией и тем самым повысить эффективность работы системы, а также качество принимаемых решений.

Литература

1. Battyshin I., Herrera-Avelar R., Sheremetov L., Panova A. Moving Approximation Transform and Local Trend Associations in Time Series Data Bases. In: Perception-Based Data Mining and Decision Making in Economics and Finance. Studies in Computational Intelligence, Springer, vol. 36, 2007, 55-83.
2. Гришина Е.Н., Солдатенко И.С. О сокращении размерности пространства признаков в задачах прогнозирования неисправностей вагонного оборудования // Нечеткие системы и мягкие вычисления. Том 7, №2, декабрь 2012. С. 73-80.
3. Иванова Е.И., Гордеев Р.Н., Михайлов В.В., Северов А.В., Язенин А.В. Модель централизованной интеллектуальной информационной системы для решения задач диагностики и прогнозирования неисправностей вагонного оборудования и управления им на железнодорожном транспорте. // Нечеткие системы и мягкие вычисления. Том 7, №2, декабрь 2012. С. 51-71.
4. О Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года / РЖД – Электрон. дан. [Б.м. 2008]. – Режим доступа: http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?STRUCTURE_ID=704&layer_id=5104&id=3997

Захаров А.В., Кольцов П.П., Кравченко А.А.,
Котович Н.В., Куцаев А.С., Осипов А.С., НИИСИ РАН, г. Москва

О технологии сравнительного анализа программно-технических решений в области обработки визуальной информации в интересах ОАО «РЖД»

Введение

Настоящая работа посвящена результатам, полученным в ходе выполнения проекта 13-07-13128 офи_м_РЖД «Методология и инструментальное средство для поддержки объективного выбора программных и технических решений в области обработки результатов дистанционного зондирования в интересах ОАО «РЖД»». Актуальность работы обусловлена двумя факторами. Первый из них связан с инициированной ОАО «РЖД» Технологической Платформой «Высокоскоростной интеллектуальный железнодорожный транспорт», одной из основных целей которой является «обеспечение комплексной многоуровневой безопасности движения» [1]. Одним из элементов такой многоуровневой безопасности является мониторинг и прогнозирование потенциально опасных ситуаций, в том числе, и с использованием дистанционного зондирования. Вторым фактором является наличие большого предложения коммерческих продуктов, ориентированных на различные виды обработки результатов дистанционного зондирования, что порождает проблему выбора среди них наиболее адекватных как решаемым задачам, так и условиям их практического применения (при этом стоимость предлагаемых решений достаточно высока). В работе был выбран класс задач обеспечения безопасности для железнодорожного транспорта, использующих информационные технологии. А именно, в качестве предметной области были рассмотрены программно-технические решения, используемые для решения задач мониторинга и прогнозирования потенциально опасных для железнодорожного транспорта ситуаций, методами, основанными на обработке визуальной информации. Для этих методов в работе было предложено решение фундаментальной задачи: создание объективной методологии их сравнительной оценки.

Сложность решения задачи создания данной методологии заключается в необходимости разработки механизма объективного сопоставления решений, базирующихся на совершенно разнородных моделях, лежащих в их основе. Другими словами, использование широкого спектра критериев качества, вариации в программных реализациях, превращают проблему создания объективной методологии сравнения различных решений одной и той же задачи, опирающейся

на аналитические методы, затруднительной. Поэтому в проекте было предложено использовать эмпирический метод оценки различий программных реализаций. Этот метод был ранее успешно апробирован при оценке качества конкурирующих программных решений (базирующихся на существенно различных математических моделях) задач обработки визуальной информации [2-3]. Именно он стал методологической основой разработанной в проекте технологии сравнительного анализа решений конкретных задач из рассматриваемого класса.

Эмпирический метод оценки программных реализаций

Основой технологии сравнительного анализа программно-технических решений, используемой в проекте, является эмпирический метод, когда сравнению подвергаются результаты различных решений, получаемые на некотором фиксированном наборе исходных данных. Для рассматриваемого в проекте случая такими исходными наборами данных служит совокупность тестовых изображений. При этом для каждого из тестовых изображений априори задан эталон/ground truth образ – точное решение задачи обработки визуальной информации. Сравнение методов проводится по результатам работы программно-технических средств на тестовом наборе. Эти результаты представляют собой количественную меру различия между точным, ground truth решением и результатом применения конкретного средства. Такой подход к сравнению принято называть discrepancy method [4], что, в свою очередь, определило выбор названия предлагаемой методологии EDEM – Empirical Discrepancy Evaluation Method [5]. Рассмотрим этапы работы в соответствии с предлагаемой методологией. На первом этапе формируется множество тестовых изображений. Разработка таких изображений является неформальной задачей. Это связано с тем, что к набору тестовых изображений естественно предъявлять требования на наличие в нём ситуаций, типичных для решаемой задачи. С другой стороны, в этом наборе должны присутствовать ситуации, провоцирующие появление ошибок в работе тестируемых средств, то есть являющиеся трудными для их корректной работы. Для рассматриваемых задач с визуальной информацией необходимо также учитывать и возможные варианты внешних условий,

в которых могут применяться тестируемые средства. Требования такого сорта трудно формализовать, тем не менее, можно сформулировать требования к формированию тестового набора через конкретизацию представления о глубине тестирования программно-технических средств [5]. А именно, в предположении о проведении исчерпывающего тестирования возникает требование перебора всех изображений из тестового набора, для которого доказана полнота ситуаций возникающих на изображении при решении конкретной практической задачи, включая условия применения. В случае проведения тестирования на экстремальных в некотором смысле ситуациях, возникает требование о формальном определении экстремальных характеристик изображений и требование доказательства репрезентативности тестового набора (подробнее см. [5]). Очевидно, что в случае невозможности выполнения требований, связанных с доказательством, используются экспертные знания.

В роли количественной оценки качества работы программно-технических средств на тестовом наборе берётся некоторая мера различия между результатом работы программно-технического средства на тестовом наборе и истинным *ground truth* решением задачи. На втором этапе работы эмпирического метода необходимо конкретизировать эту меру, исходя из специфики решаемой задачи и учитывая содержательный смысл меры.

Третий этап представляет собой получение значений мер близости для сравниваемых программ между результатами их применения на тестовом наборе и соответствующими *ground truth* образами.

Описанный эмпирический подход позволяет ранжировать программно-технические средства, используемые при решении некоторой конкретной задачи, по степени их близости к точному *ground truth* решению. При этом в зависимости от выбора конкретной меры близости результаты можно интерпретировать в различных терминах – устойчивости к возмущениям, близости в среднем и т.д. Можно считать, что эмпирический подход дает объективное ранжирование в терминах используемых мер близости.

Эмпирическое оценивание для рассматриваемых задач

В качестве классов задач из области обеспечения безопасности железнодорожного транспорта в проекте были рассмотрены задачи, относящиеся к дистанционному зондированию потенциально опасных ситуаций при помощи дистанционно пилотируемого летательного аппарата (ДПЛА) и задачи идентификации персонала по видеоизображению.

Использование ДПЛА для задач обеспечения безопасности железнодорожного транспорта является

одной из современных технологий с постоянно расширяющейся областью применения. Можно, например, отметить использование ДПЛА для борьбы с вандализмом на железных дорогах [5]. Использование ДПЛА в задачах обеспечения безопасности железнодорожного транспорта обычно подразумевает поддержку управленческих решений в реальном масштабе времени, заключающуюся в автоматическом выделении (сегментации) на изображении, поступающем с борта ДПЛА, потенциально опасных областей. В настоящее время имеются разнообразные методы решения задачи выделения таких областей на изображении. Одним из наиболее распространённых методов сегментации является так называемый *boundary-based* метод, опирающийся на результаты детектирования границ на изображении. Для проверки реализуемости разрабатываемой методологии EDEM, в проекте было выполнено сравнительное исследование ряда методов выделения границ. Например, были взяты программные реализации следующих детекторов границ: Canny, Rothwell, Heitger, Black, Iverson и Smith [3, 5]. В соответствии с приведенной выше этапностью, опишем использованный набор тестовых изображений. В этот набор были включены искусственные изображения с прямой границей переменной ширины и с изменяющимся вдоль неё контрастом. Такие особенности границ были выбраны потому, что факт плохой работы детекторов на таких границах является известным. Далее, для моделирования внешних условий, в состав тестовых изображений были введены эти же изображения, но с добавлением гауссова шума, а также размытия при варьировании управляющих параметров шума и размытия. На Рис. 1 приведены соответствующие примеры.

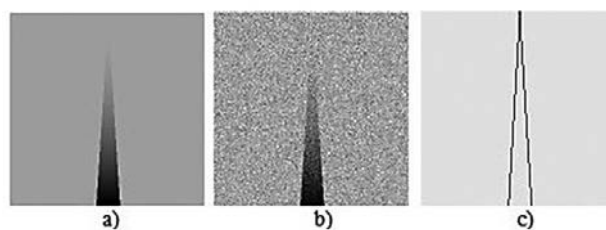


Рис. 1. Примеры изображений:
а) тестовое изображение без зашумления,
б) с зашумлением, в) соответствующий *ground truth* образ

На следующем этапе в качестве меры расстояния между результатами работы детекторов границ и точным *ground truth* решением задачи детектирования были рассмотрены чувствительность и специфичность. Первая мера есть доля точек истинной границы среди точек, отнесённых детектором к граничным, относительно всех имеющихся истинных точек границы, а вторая – доля точек истинной границы относительно

всех точек, отнесённых детектором к граничным. На Рис.2 дан пример результатов (в процентах), полученных при обработке изображения Рис.1 а), размытого окнами различного размера.

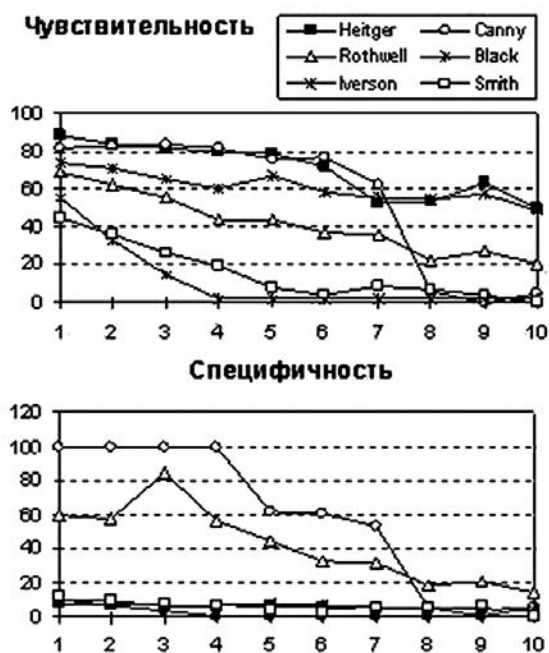


Рис. 2. Результаты тестирования для изображения Рис.1 а).
Ось абсцисс – ширина окна размытия.

Использование выбранных критериев качества позволило выявить среди них лидеров и аутсайдеров. Легко видеть, что при малых и средних окнах осреднения детектор границ Canny предпочтителен по обоим критериям.

В качестве второй задачи дистанционного мониторинга, для апробации возможности применения методологии EDEM, была рассмотрена задача выделения на изображении важных в контексте решаемой внешней задачи элементов. Пример таких важных частей изображения для задачи мониторинга потенциально опасных ситуаций приведён на Рис.3.



Рис. 3. А – важные части изображения

Принципиальная неопределённость, существующая в локализации положения границы, отделяющей объект от фона при обработке данных дистанционного зондирования, возникающая из-за несовершенства съёмочной аппаратуры и ряда других факторов, определила использование теории нечётких множеств при оценке средств, используемых для решения задач сегментации, а также детектирования важных элементов изображения.

В работе было выполнено сравнение качества результатов работы программных реализаций нескольких исследованных выше методов на задаче выявления значимых точек на изображении [3], [5]. В рамках методологии EDEM это потребовало построения нечётких ground truth образов и использования нечётких (т. е. способных работать с нечёткими входными данными) мер различия. Был сделан вывод о перспективности использования методологии EDEM для получения оценки качества программных продуктов для задач выделения на изображении важных элементов.

Задача идентификации персонала по видеоизображению, относящаяся к числу задач обеспечения железнодорожной безопасности, была рассмотрена в проекте также в качестве пилотной задачи для проверки возможности практического применения разрабатываемой методологии EDEM. Задачи этого типа решаются в системах контроля персонального доступа при необходимости обнаружения определённого человека в потоке визуальной информации и относятся к задачам, формулируемым в терминах распознавания человека по его изображению. В настоящее время имеется ряд конкурирующих программных продуктов, решающих данную задачу. Относительно невысокая надёжность этих продуктов делают проблему сравнительной оценки этих программ с целью выявления лучших, весьма острой. При создании тестового набора изображений в качестве эталона/ground truth было взято изображение лица в анфас, а тестовый набор состоял из изображений в профиль, а также изображений с поворотом головы и внесением контролируемых искажений (зашумления, размытия, изменением фона и т. п.), Рис. 4.

Для более тонкого анализа качества сравниваемых средств тестовые изображения были разбиты на 5 групп по углу поворота изображения. Такое разбиение позволяет выявлять устойчивость работы сравниваемых методов к изменению ракурса изображения.

Для количественной оценки качества работы различных программных средств было взято число правильно опознанных изображений. В качестве средств, применяемых для распознавания лиц, были взяты известные программы Rohos Face Logon, UniQFace и Luxand Blink. В Таблице 1 приведены результаты их работы на вышеописанном тестовом материале.

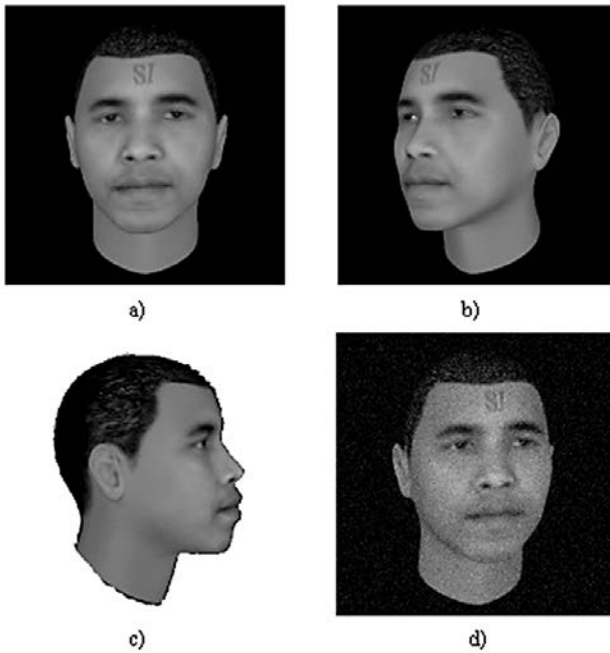


Рис. 4. Примеры эталонного и тестовых изображений: а) – эталонное изображение, б) – малый поворот, с) – профиль (светлый фон), д) – зашумленное.

Таблица 1.

	Анфас (эталон и искажения)	Малый поворот	Средний поворот	Профили (левый и правый)	Иные изображения
Всего изображений	7	7	7	8	Более 50
Rohos Face Logon распознано	7	6	0	0	0
UniQFace распознано	7	7	2	0	0
LuxandBlink распознано	7	6	5	1	0

Нетрудно видеть, что, наибольшую устойчивость распознавания относительно различных искажений тестовых изображений проявила программа LuxandBlink, наименьшую – Rohos Face Logon. Однако интегрально качество работы всех рассмотренных программ невысоко. Таким образом, и для рассмотренной задачи идентификации персонала использование разрабатываемой методологии EDEM оказалось продуктивным.

Основные принципы методологии EDEM.

Технология оценивания

Приведённые выше результаты апробации эмпирического оценивания для получения объективной оценки качества работы программно-технических средств,

используемых при обработке визуальной информации, показало не только их эффективность, но позволили сформулировать основные принципы такого оценивания, составляющие суть методологии EDEM:

1. Оценивание использует априорное знание истинного решения частных задач, которых должно решать оцениваемое средство.
2. Набор частных задач с известным истинным решением должен быть представительным как с точки зрения сравниваемых средств, так и с точки зрения ожидаемых условий применения.
3. Оценивание проводится на основе меры близости между результатом работы оцениваемого средства на наборе частных задач и истинным решением задачи.
4. Выбор конкретной меры близости делается априори, исходя из требуемой содержательной интерпретации результатов оценивания.

Сформулированные принципы позволяют построить технологическую цепочку для работы по сравнительному анализу программно-технических средств в области обработки визуальной информации в интересах ОАО «РЖД»:

- I. Определить глубину тестирования программно-технических средств.
- II. Задать набор эталонов – ground truth изображений и тестовых изображений, удовлетворяющих требованиям по глубине тестирования.
- III. Определить меру близости между результатами работы тестируемых средств и истинным ground truth решением по всему набору тестовых изображений.
- IV. Построить ранжированную на основе мер близости последовательность сравниваемых средств.
- V. Интерпретировать на основе содержательного значения использованной меры близости результаты ранжирования.

Инструментальная среда для поддержки методологии EDEM

Эффективное применение методологии EDEM требует наличия соответствующего инструментального средства, которое разрабатывается в рамках реализации настоящего проекта. Назначение инструментального средства – предоставить возможность пользователю создавать, хранить и редактировать тестовые и эталонные изображения, вносить контролируемые возмущения в тестовый материал, использовать различные меры близости, отображать результаты сравнительного исследования различных программно-технических средств. Изначально программной основой методологии EDEM была система PICASSO, включавшая в себя перечисленные выше возможности и допу-

при его сегментации). Здесь также использование нечетких *ground truth* образов и нечетких мер сходства является перспективным. В настоящее время продолжается разработка нечетких *ground truth* эталонов для распознавания важных частей лица.

В данной инструментальной среде проведено пилотное тестирование многопользовательской системы мониторинга земной поверхности DEDAL, разработанной ранее участниками проекта [2]. Система была настроена для решения упомянутых выше задач железнодорожной безопасности. Тестирование выявило ряд слабых мест системы, помогло определить возможные пути их устранения. Тем самым, разрабатываемая инструментальная среда доказала свою практическую полезность.

Заключение

Работа по проекту «Методология и инструментальное средство для поддержки объективного выбора программных и технических решений в области обработки результатов дистанционного зондирования в интересах ОАО «РЖД», выполненная в рамках гранта РФФИ 13-07-13128 офи_м_»РЖД», позволила сделать заметное продвижение в исследованиях по фундаментальной теме: разработка объективных методов оценки программных решений для задач обработки изображений. Была решена главная задача проекта – создана научно обоснованная методология EDEM выбора адекватных программных решений задач управления инфраструктурой железнодорожного транспорта, обеспечивающих безопасную эксплуатацию, относящихся к задачам мониторинга технических средств.

Были получены следующие научные результаты.

1. Сформулирован общий подход к сравнительному исследованию методов обработки и анализа изображений и их программных реализаций.
2. Выполнен анализ результатов сформулированного подхода к алгоритмам выделения граничных точек, реставрации изображений, сегментации изображений, текстурного анализа, распознавания изображений.
3. Сформированы требования к тестовым и эталонным изображениям.

4. Обосновано использование для исследования методов сегментации изображений нечетких *ground truth* эталонов и нечетких мер различия.

На основе этих результатов в проекте были сформулированы принципы методологии EDEM, разработана технология работ по сравнительному анализу программно-технических средств в области обработки визуальной информации в интересах ОАО «РЖД». В рамках работ по проекту было создано инструментальное средство, позволяющее выполнять выбор адекватных программно-алгоритмических решений в классе задач управления инфраструктурой железнодорожного транспорта, обеспечивающих безопасную эксплуатацию, в том числе задач мониторинга и контроля состояния технических средств, ориентированных на визуальную информацию.

Литература

1. Российские технологические платформы: Высоко скоростной интеллектуальный железнодорожный транспорт. URL: http://www.hse.ru/org/hse/tp/transp_hispeed.
2. И. В. Грибков, А. В. Захаров, П. П. Кольцов, Н. В. Котович, А. А. Кравченко, А. С. Куцаев, В. К. Николаев, А. С. Осипов. Сравнительное исследование методов анализа изображений, М., НИИСИ РАН, 2005.
3. П. П. Кольцов. Об одном подходе к оценке качества видеографической информации. Программные Продукты и Системы, 2013, № 4, стр. 10-17.
4. Y.J. Zhang, A survey on evaluation methods for image segmentation, Pattern Recognition, Vol.29, No.8, 1996, pp.1335-1346.
5. Захаров А.В., Кольцов П.П., Котович Н.В., Кравченко А. А., Куцаев А.С. Осипов А.С. Прямая оценка качества программных продуктов. Критерии и тестовые материалы. Программные Продукты, Системы и Алгоритмы, 2014, Вып. № 3, стр. 1-8.
6. G.Jäger, U.Benz, Measures of Classification Accuracy Based on Fuzzy Similarity. IEEE Trans. On Geoscience and Rem. Sensing, Vol. 38, No. 3, 2000, pp. 1462-1467.

Каркищенко А.Н., Мнухин В.Б.,
Абраменко А.А., Гречухин И.А., Левашев С.П., ЮФУ, г. Таганрог

Распознавание объектов железнодорожной инфраструктуры по данным лазерного сканирования.

Введение

В настоящее время железнодорожный путь понимается не просто как протяженный участок, а как сложная структура, учитывающая взаимодействие различных факторов, в том числе воздействие объектов, расположенных на прилегающих территориях. Поэтому мониторинг его инфраструктуры сводится к комплексу задач, одной из которых является необходимость с большой скоростью в автоматическом режиме определять пространственное положение и геометрические параметры пути, а также искусственных сооружений в полосе отвода, в частности, для распознавания вновь образовавшихся объектов.

Одним из путей решения подобных задач является совместное использование изображений и трехмерных облаков точек лазерного сканирования. Эти данные взаимно дополняют друг друга, предоставляя информацию о трехмерной форме наблюдаемых объектов, в частности, в виде карт глубин. В то же время агрегирование информации из разных по природе источников предполагает предварительное решение таких задач, как преобразование данных лазерного сканирования к виду, удобному для дальнейшей обработки, а также сегментацию полученных данных на отдельные объекты или группы. Методы решения этих задач рассмотрены в [1].

Работа посвящена методам распознавания и классификации объектов железнодорожной инфраструктуры в предположении, что предварительная сегментация данных уже проведена на основе описанного в [1] подхода.

Изложение метода

Будем опираться на стандартное понимание задачи распознавания, предполагающее наличие базы эталонных объектов с характеризующими их признаками классификации. Заметим, что предварительный выбор возможных (точнее, отбрасывание заведомо неподходящих) объектов можно провести на основе соотношения геометрических параметров сегментированного объекта (длина, высота, площадь, неравномерность глубин фронтальной части, иные элементы формы и пр.). В то же время точное распознавание объекта предполагает использование более тонких класси-

цирующих признаков, адаптированных к методам лазерного сканирования.

Описываемый подход предлагает в качестве таких признаков использовать контуры, возникающие при рассечении карт глубин предварительно выделенных объектов последовательностью параллельных фронтальных плоскостей. Для каждого объекта получается, таким образом, монотонная относительно расстояния от точки сканирования последовательность вложенных кривых. Анализ этой последовательности позволяет строить наиболее правдоподобные предположения о типе объекта. Заметим, что при этом необходимо предварительно провести общую оптимизацию положения точек контуров. Такое сглаживание может проводиться, в частности, с помощью модифицированного алгоритма метода активных контуров, предложенного в [4].

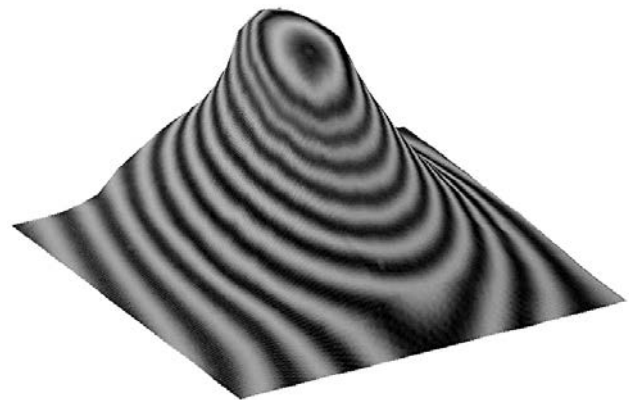


Рис. 1. Представление объекта последовательностью контуров.

Установление степени соответствия найденного контура с контуром эталонного объекта осложняется неопределенностью выбора точки, из которой проводилось сканирование. Тем самым наблюдаемые данные подвергаются преобразованиям сдвига, масштабирования и вращения с заранее неизвестными параметрами. Это приводит к необходимости использовать для распознавания соответствия контуров дескрипторы, инвариантные относительно указанных видов преобразований. Ниже предлагается следующий метод построения подобного дескриптора.

Описание алгоритма

Под изображением будем понимать полутоновое цифровое изображение достаточно высокого разрешения (порядка 512×512). Как было сказано выше, наблюдаемому объекту A сопоставляется упорядоченная совокупность $C(A)=(c_k)$ изображений контуров, полученных из анализа карты глубин и облака лазерных точек. Такие изображения неизбежно оказываются зашумленными и требуют предварительной обработки, являющейся первым этапом предлагаемого алгоритма.

Этап коррекции. Он состоит из нескольких этапов:

1. Фильтрация. Предполагает статистический анализ изображения, удаление отдельных изолированных точек и выделение областей сгущения.
2. Выявление характерных точек и «прорисовка» с их помощью предполагаемого замкнутого контура на основе метода активных контуров [4].
3. Бинаризация полученного изображения.
4. Утоньшение контура с помощью одного из методов утоньшения линий на изображении (например, алгоритма скелетизации Зонга-Суня [2]).
5. Сглаживание контура

Последовательные этапы предварительной обработки контура показаны на рис.2. Отметим, что её результаты зависят, в частности, от таких факторов, как параметры и методы фильтрации, оптимальности выбора характерных точек, и т.д. Поэтому обработку первичных данных представляется целесообразным проводить несколько раз, меняя параметры фильтров, и ориентируясь на наилучший из полученных результатов.

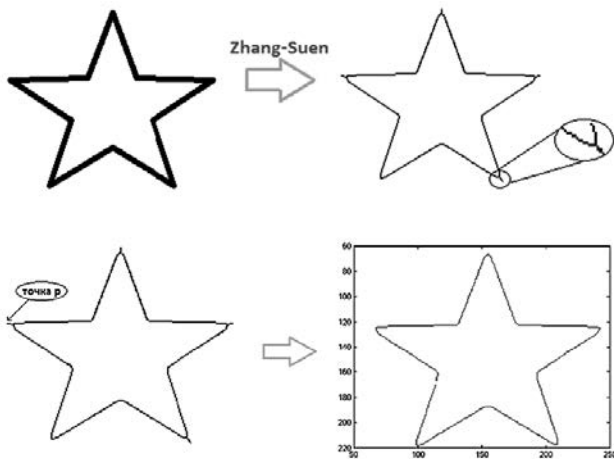


Рис. 2. Последовательные этапы обработки контура.

Построение дескриптора контура. Следующий этап начинает обработку самого контура. Вначале определяется длина l_c контура как общее число входящих в него пикселей. Затем на контуре произвольно выбираются направление обхода и начальная точка p_1 , после чего он разбивается на n равных частей точка-

ми p_1, p_2, \dots, p_n . Это позволяет рассматривать контур C как упорядоченную совокупность векторов $s_i=(p_i, p_{i+1})$. При этом число n зависит от длины l_c обрабатываемого контура и выбирается с учетом ряда факторов, которые будут рассмотрены ниже.

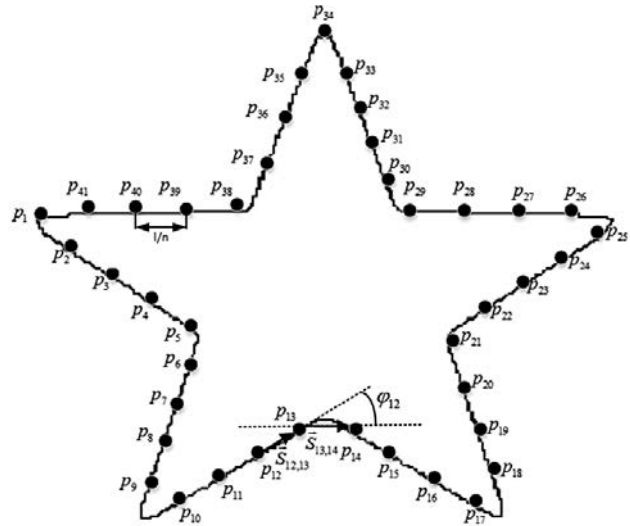


Рис. 3. Векторизация контура и построение массива углов.

Затем по набору (s_0, s_1, \dots, s_n) формируется вектор $B_C=(\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n)$ углов между последовательными векторами s_i и s_{i+1} с учетом направления обхода, выбранного предварительно, см. рис.3. Как несложно заметить, этот вектор инвариантен относительно смещений и вращений исходного объекта, а изменение ориентации контура приводит к обращению порядка следования его компонент. Более того, при достаточно большом числе n точек разбиения B_C , рассматриваемый с точностью до циклического сдвига, практически не зависит от выбора начальной точки p_1 . Таким образом, B_C является достаточно сильным дескриптором контура C . В то же время его характеризующая способность существенно зависит от оптимального выбора n . Действительно, она, как очевидно, падает при малом n ; в то же время при большом n на вектор B_C всё большее значение начинают оказывать случайные шумы и несущественные детали. Как показали сделанные эксперименты, целесообразно выбирать $n=l_c/d$, где $d=3 \div 7$ в зависимости от характера наблюдаемого объекта.

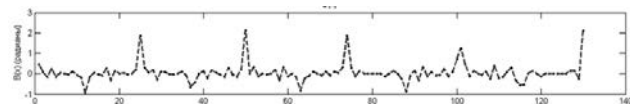


Рис. 4. Вектор B_C (при $d=3$) для контура, показанного на рис. 3.

Построение дескриптора контура завершает вычисление дискретного Фурье-спектра $F_C=|F[B_C]|$ вектора B_C . Поскольку Фурье-спектр инвариантен относитель-

но циклических сдвигов B_C , вектор F_C можно, в силу сказанного выше, считать не зависящим от выбора начальной точки контура C . Изменение направления обхода контура обращает порядок следования компонент F_C , что легко учитывается. Заметим, что поскольку Фурье-спектр действительного вектора симметричен относительно начальной точки, информативной будет только половина компонент F_C . Более того, вычислительные эксперименты указывают на необходимость низкочастотной фильтрации спектра, см. раздел 4.

Сравнение с эталоном. Предполагается, что база данных объектов, подлежащих классификации, содержит для каждого из них набор эталонных изображений контуров, получаемых при сечении объекта фронтальными плоскостями, перпендикулярными к оси сканирования. Расстояние Δx между последовательными плоскостями предполагается фиксированным; плоскости (а значит, и соответствующие контуры) упорядочены по расстоянию до точки сканирования так, что начальный контур соответствует минимальному расстоянию от точки сканирования до объекта. Будем считать, что эталонные контуры заданы в векторном формате, что позволяет их масштабировать. Кроме того, для каждого из объектов будем считать известными параметры, позволяющие найти оптимальное число точек разбиения контуров.

Пусть (e_k) – последовательность контуров эталонного объекта E базы данных, а (c_k) – наблюдаемая последовательность контуров некоторого объекта C , построенная по результатам лазерного сканирования. Поскольку величина Δx считается фиксированной, можем считать, что для заданного k контуры e_k и c_k соответствуют одной и той же секущей плоскости. Таким образом, в случае $E=C$, контуры e_k и c_k можно (пренебрегая эффектами перспективы) считать различающимися только масштабированием, сдвигом и вращением. Проведем масштабирование эталонного контура так, чтобы получаемый в результате контур s_k имел бы ту же площадь, что и наблюдаемый контур c_k . Затем, выбирая число точек разбиения в соответствии с рекомендациями базы данных, вычислим векторы F_C и F_S . В качестве меры близости контуров e_k и c_k возьмем величину

$$d_k = \| \| F_C - F_S \| \| / \| F_S \|,$$

где норма понимается в обычном евклидовом смысле [3].

Нахождение меры близости объектов. Мету близости объектов E и C введем как взвешенное среднее величин d_k , то есть, как

$$D(E,C) = (a_1 d_1 + a_2 d_2 + \dots + a_n d_n) / n,$$

где $a_k > 0$ и $a_1 + a_2 + \dots + a_n = 1$.

Необходимость введения весов a_k связана с различной информативностью отдельных частей объекта. Вычисление таких мер для всех эталонных объектов базы данных позволяет провести классификацию путем выбора наиболее близкого объекта или каким-либо иным образом.

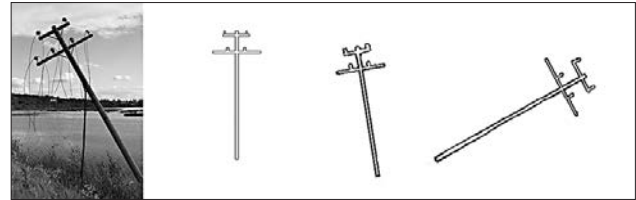


Рис. 5. Первая группа эталонных объектов и контуры c_{11} , c_{12} и c_{13} .

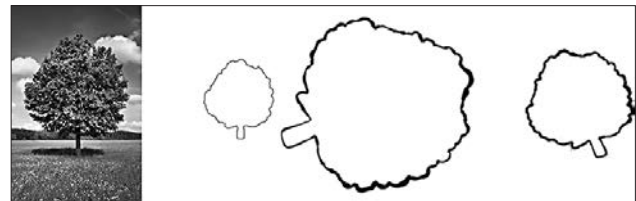


Рис. 6. Вторая группа эталонных объектов и контуры c_{21} , c_{22} и c_{23} .

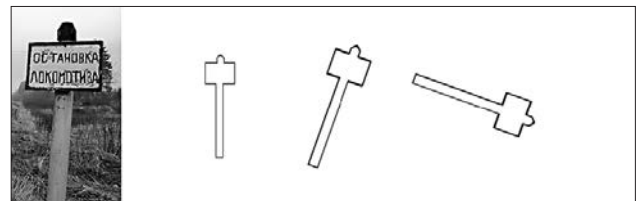


Рис. 7. Третья группа эталонных объектов и контуры c_{31} , c_{32} и c_{33} .

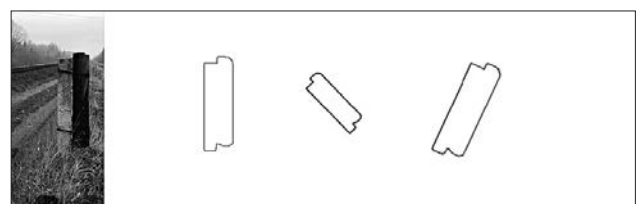


Рис. 8. Четвертая группа эталонных объектов и контуры c_{41} , c_{42} и c_{43} .

Результаты экспериментов

Численные эксперименты проводились на данных, полученных путем моделирования. В качестве эталонов были выбраны объекты четырех типов, показанные на рис.5–8. В каждой группе выделялся эталонный контур (показанный на рисунках первым), который сравнивался с другими контурами на основе описанного выше подхода. Длины контуров варьировались в интервале $300 \div 800$.

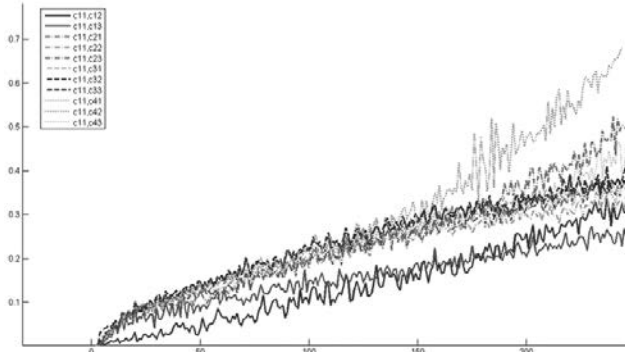


Рис. 9. Мера близости контура c_{11} к остальным контурам при отсутствии низкочастотной фильтрации.

Рис. 9 показывает меру близости контура c_{11} (телеграфный столб) к остальным десяти контурам в зависимости от числа точек разбиения при отсутствии низкочастотной фильтрации. Можно заметить, что контура c_{12} и c_{13} эффективно распознаются при числе точек разбиения от 65 до 110. При выходе за пределы этого диапазона точность распознавания существенно уменьшается.

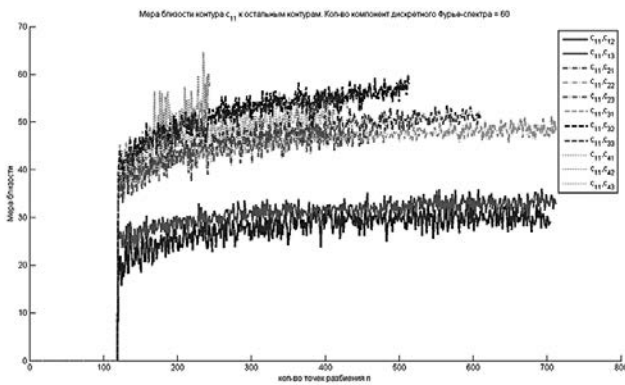


Рис. 10. Мера близости контура c_{11} к остальным контурам при низкочастотной фильтрации спектра.

Следующий рисунок демонстрирует распознавание объектов первого типа с отбрасыванием высокочастотных компонент Фурье-спектра. Нетрудно заметить возросшую робастность результатов распознавания.

Литература

1. Каркищенко А.Н., Мнухин В.Б., Абраменко А.А., Гречухин И.А., Левашев С.П. Сегментация объектов инфраструктуры по данным лазерного сканирования. – В кн.: Интеллектуальные системы на транспорте: Материалы IV междунар. научно-практической конф. «Интеллект-Транс-2014». – СПб.: ПГУПС, 2014.- с. 134-141.
2. Zhang T. Y.Suen C. Y. A Fast Parallel Algorithm for Thinning Digital Patterns, Communications of the ACM, p. 236–239, 1984.
3. Каркищенко А.Н., Броневиц А.Г. Меры информативности сегментированных изображений. - В кн.: Труды междунар. конференций «Искусственные интеллектуальные системы» (IEEE AIS'02) и «Интеллектуальные САПР» (CAD-2002). - М.: Изд-во Физматлит, 2002, с. 138-143.
4. Каркищенко А.Н., Гречухин И.А. О методе построения характерных точек на основе вариации яркостного профиля. – Труды НИИАС, вып. 9, с. 89-107, 2011.

Долгий А.И., Хатламаджиян А.Е., Кудюкин В.В., ФГБОУ ВПО РГУПС, г. Ростов-на-Дону

Развитие технологии технического зрения для решения комплексных задач на железнодорожном транспорте

Введение

Стремительный рост предложений на рынке вычислительной техники последних лет дал серьезный толчок в развитии программно-алгоритмических средств, еще несколько лет назад, казавшихся нереализуемыми по причине высокой ресурсоемкости. Так научное направление систем технического зрения переживает новую волну внедрения в широком спектре отраслей экономики. Не является исключением и железнодорожный транспорт в части разработки и использования информационно-управляющих и контрольно-диагностических систем.

В настоящей работе представлен обзор наиболее интересных, по мнению авторов, приложений технического зрения для ж.д. транспорта РФ, включающий в себя как описания уже известных направлений, так и примеры решений новых задач.

1. Идентификация ж.д. подвижных единиц

Первые промышленные образцы отечественных систем автоматизированного учета вагонооборота на основе оптического распознавания инвентарных номеров вагонов появились в начале 2000-х годов. Однако уровень научной базы и развития аппаратных средств на тот момент времени не позволяли достичь высокой степени статистической достоверности распознавания номеров вагонов, при влиянии таких факторов, как отклонение начертания шрифтов от нормативного, загрязненность бортов вагонов, сложные погодные условия и условия освещенности. По данным, взятым из доступных источников, статистическая достоверность распознавания этих систем составляла от 80 до 95% в зависимости от влияния вышеречисленных факторов, а также в зависимости от скорости движения состава.

На сегодняшний день, можно констатировать, что уровень развития технических средств, а также разработанная программно-алгоритмическая база для систем автоматизированного распознавания инвентарных номеров вагонов, включающая комплекс новых интеллектуальных моделей и методов распознавания, позволяет достичь существенно более высоких показателей стабильности и статистической достоверности работы [1]. В ходе проведения испытаний при приеме в постоянную эксплуатацию универсальной системы автоматического распознавания номеров вагонов (УС

АРНВ), статистическая достоверность распознавания составила 99,97% с учетом восстановления информации о натурном листе поезда из АСУ верхнего уровня (АСОУП).

На рисунке 1 (а, б) представлены фрагменты интерфейса УС АРНВ, отражающие просмотр архивных данных и статистику по отдельному региону соответственно.

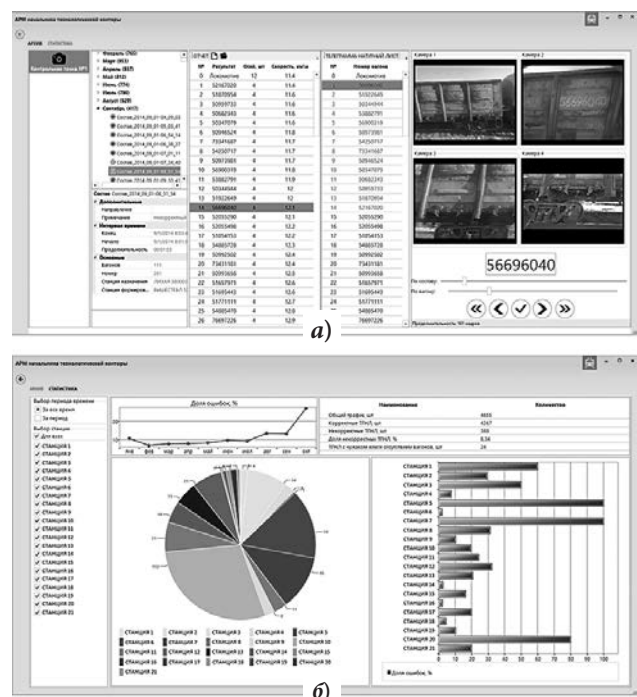


Рис.1. Система распознавания номеров ж.д. вагонов (АРНВ): а – архив данных, б – статистика для региона

Но основной вопрос об использовании подобных систем заключается даже не в качестве распознавания, а в принципиальном понимании технологической эффективности и важности наличия корректных натуральных листов для межхозяйственного взаимодействия в компании ОАО «РЖД», улучшении условий труда, а также возможности реализовать уже «зрелые», сформировавшиеся подходы к созданию автоматических систем по вагонному моделированию на ж.д. транспорте [2].

Решение последней задачи представляет особый интерес и направлено на качественный переход от АСУ с «ручным» вводом данных о формировании, расформировании и проследовании составов к среде

автоматического моделирования поездной и вагонной ситуации на полигоне. Открывая при этом новые возможности перед персоналом дирекции движения и в целом грузовой и коммерческой деятельности ОАО «РЖД».

Имеющиеся сегодня положительные прецеденты использования систем автоматической идентификации подвижных единиц в качестве основы автоматизации сортировочного процесса на станции, например, в системе ИТАУР (ст. Ярославль-Гл.), позволяют развивать этот подход на всю сеть дорог, наращивая при этом дополнительную функциональность в части подсистем счета осей, технической диагностики и др.

2. Техническая диагностика состояния вагонного парка

Система автоматического визуального диагностирования ж.д. вагонов «Техновизор» реализует естественный и общедоступный подход к обработке и анализу информации об объекте, получаемой путем видеофиксации отдельных конструктивных элементов подвижных единиц.

Принцип проверки, основанный на визуальном осмотре подвижного состава и инструментальном измерении технических параметров, предполагает персональную ответственность сотрудника службы вагонного хозяйства за принятие решения о наличии неисправностей в узлах и конструктивных элементах вагонов, влияющих на безопасность движения поездов. Наиболее естественным, верифицируемым и эффективным подходом к автоматизации этого процесса является использование высокочувствительных оптических датчиков (системы видеокамер) высокого разрешения, позволяющих на скоростях до 120 км/ч фиксировать интересующие конструктивные части вагонов и в режиме реального времени анализировать их состояние. Одним из принципиальных отличий указанного подхода от используемых в существующих системах диагностики подвижного состава в ОАО «РЖД», является высокая степень открытости и возможности проверки истинности результатов с помощью дистанционного просмотра исходных данных (изображений). При этом в некоторых случаях возникает возможность визуального подтверждения неисправностей, проявляемых исключительно в процессе движения вагона.

Ввиду широких возможностей метода скоростной видеофиксации для решения задач вагонного хозяйства можно выделить следующие основные направления работы системы «Техновизор»:

- диагностирование состояния отдельных элементов тележки (занижение/завышение фрикционных клиньев, наличие/отсутствие тормозных колодок, болтовых соединений и др.);

- диагностирование состояния технических узлов подвагонного пространства;
- диагностирование состояния элементов автосцепки;
- анализ равномерности загрузки вагона;
- определение фактического инвентарного номера вагона.

На рис.2 представлена диаграмма распределения причин отцепок вагонов на СКЖД за первое полугодие 2014 года.

Согласно этим данным наибольшее количество отцепок – 134 вагона (52,7%) приходится на долю неисправностей в узлах тележек, что является фактическим подтверждением приоритетности задачи автоматического диагностирования этого элемента.

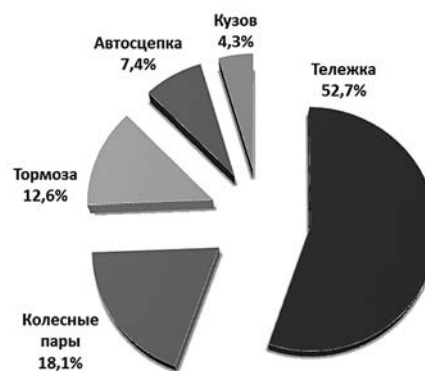


Рис.2. Диаграмма причин отцепок вагонов на СКЖД за I полугодие 2014 года

Одной из часто встречаемых проблем в работе тележки является неравномерное распределение нагрузки на ее узлы, связанное с занижением/завышением фрикционного клина. При завышении клина уменьшается сила трения гасителя колебаний и, соответственно, ухудшается процесс гашения вертикальных колебаний, возникает вероятность схода порожних вагонов. При занижении клина увеличивается сила трения гасителя колебаний, что может привести к заклиниванию клина и выключению из работы рессорного подвешивания. Все это приводит к росту напряжений в элементах кузова и боковой рамы тележки, что, в свою очередь, повышает вероятность возникновения трещин усталостного характера, а впоследствии, и возникновению излома боковой рамы.

На Рисунке 3 представлен пример автоматического диагностирования занижения/завышения фрикционного клина.

По динамическому влиянию на верхнее строение пути помимо дефектов колесных пар особое внимание заслуживает обнаружение фактов перекоса кузова грузового вагона вследствие неравномерной загрузки или смещения груза, вызывающие колебания галопирования.



Рис.3. Пример определения занижения/возвышения фрикционных клиньев

Обнаружение неравномерной загрузки вагона реализуется функцией автоматической видеофиксации разности высоты пружин на разных тележках с разных сторон.

В контексте задачи автоматического технического диагностирования вагонного парка остро стоит вопрос о точной идентификации подвижной единицы. Это связано как с задачей исключения ошибок соотнесения диагностической информации с подвижной единицей в аналитических базах данных и интегральных системах сбора диагностической информации (таких как АС КОСВ, ОАО «НИИАС»), так и с необходимостью в процессе диагностирования учета точной априорной информации, получаемой согласно инструкции по техническому обслуживанию вагонов в эксплуатации [3].

С учетом вышесказанного можно сделать вывод о естественной технологической целесообразности интеграции различного функционала систем технического зрения в рамках одной аппаратно-программной среды.

Также в качестве примера, так называемой «роботизации» процесса диагностирования подвижного состава, можно предложить объединенный функционал систем на основе видеораспознавания (АРНВ, «Техновизор», Россия), акустического контроля (ПАК, Россия), тензометрии (WILD, Финляндия), имитируя тем самым базовые человеческие чувства (три из пяти) для единого центрального обработчика.

3. Контроль маневровой работы на сортировочной станции

В работе систем маневровой локомотивной сигнализации (МАЛС) на сегодняшний день актуальным остается ряд вопросов, связанных с позиционированием подвижной единицы, контролем наличия отцепа и препятствий по пути следования.

Техническое зрение в этом аспекте является логичным решением обозначенных задач как альтернативный по своей природе источник информации, в качестве нового подхода к повышению надежности, безопасности и «живучести» систем управления ЖАТ.

Система автоматического контроля маневровой работы (АКМР) позволяет осуществлять позиционирование маневрового локомотива на электронном схематическом плане полигона на основе данных датчика измерения пройденного расстояния и распознавания различных технологических ситуаций на видеоизображении, полученном с помощью бортовых оптических датчиков (видеокамер). К таким технологическим ситуациям относятся: проход стрелочного перевода по плюсовому положению, проход стрелочного перевода по минусовому положению, начало движения, остановка движения, тип стрелочного перевода (конфигурация, марка крестовины). Также система позволяет определять факт движения локомотива с отцепом/без отцепа вагонов и наличие/отсутствие препятствий по пути следования.

При этом во внешнюю среду (систему верхнего уровня) передаются факты идентификации следующих технологических ситуаций:

- начало движения фронтом/тылом;
- движение с отцепом/без отцепа;
- остановка с отцепом/без отцепа;
- проход стрелочного перевода по плюсовому/минусовому положению;
- сигнализация о вероятном наличии препятствия на пути следования.

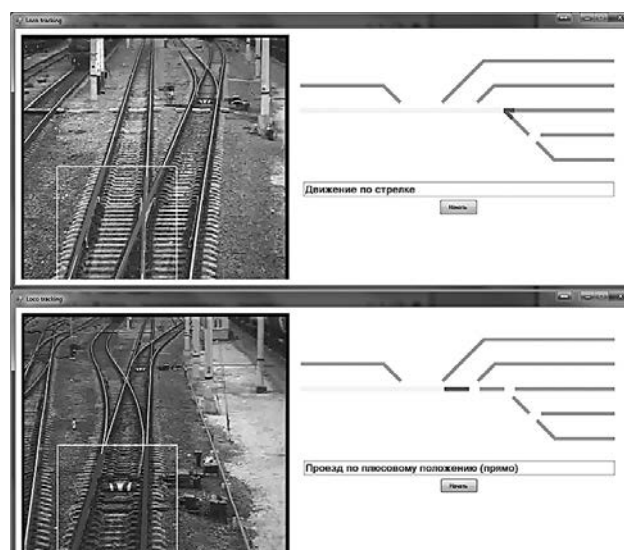


Рис.4. Внешний вид программного приложения АКМР

На практике, система АКМР может являться альтернативой для подхода позиционирования с помощью ГЛОНАСС/GPS на ж.д. транспорте, особенно в условиях подверженности влиянию различных помех и возникновению ошибок определения координат, связанных с неидеальным прохождением сигнала (из-за интерференции, вызванной рельефом местности, из-за задержек распространения сигнала, связанных с прохождением атмосферы, и др.).

В то же время логично использование этого приложения как дополнительный источник информации о местоположении подвижной единицы, повышающий общую надежность срабатывания, например, системы МАЛС. В последнем случае мы имеем мажоритарную систему по принципу построения «два» из «трех» (датчик измерения пройденного расстояния, видеокамеры АКМР и ГЛОНАСС/GPS навигатор).

Заключение

Изложенные примеры концептуального и практического решения различных прикладных задач демонстрируют широкие возможности современного применения технологии технического зрения на ж.д. транспорте. Особенно важно отметить факт потенциальной эффективности интегральных решений по объединению различного функционала систем технического зрения и смежных с ними систем, имеющих другую природу получения исходных данных, например, в области акустики, тензометрии и других электротехнических измерений.

В научном аспекте реализация подобных решений представляет большой интерес, в части создания,

адаптации и практического применения математических моделей основных физиологических процессов организма человека, относящихся к фундаментальной теме искусственного интеллекта.

Литература

1. Долгий А.И., Хатламаджиян А.Е. и др. Новые подходы к разработке систем автоматической идентификации номеров вагонов // Бюллетень Объединённого ученого совета ОАО «РЖД», Москва, № 3, 2014 г. – с. 23-40.
2. Долгий А.И., Хатламаджиян А.Е., Меерович В.Д. Разработка автоматизированной системы повагонного моделирования на железнодорожной станции // Труды второй научно-технической конференции «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте» (ИСУЖТ-2013). – Москва, 2013. С. 94 – 97.
3. Инструкция по техническому обслуживанию вагонов в эксплуатации (Инструкция осмотрику вагонов), утвержденная Советом по железнодорожному транспорту Государств-участников Содружества Протокол от 21-22 мая 2009 г. № 50.

Ермаков А.Н., Меркулов А.А.,
Панфилов С.А., Райков А.Н., НП «Аналитическое агентство «Новые стратегии», г. Москва

Экспертно-аналитический тренажер для формирования компетенций по поддержке решений в аварийных условиях на железной дороге

Введение

На современном этапе развитие железнодорожного транспорта связано не только с качественной модернизацией технического оснащения, но и с совершенствованием всей структуры управления перевозками. В условиях роста сложности технических средств, увеличения скорости и объемов перевозок растет потребность в повышении надежности и устойчивости управления, напрямую касающаяся вопросов ускорения достижения консенсуса при принятии управленческих решений руководством ОАО «РЖД», формирования согласованных целей и путей действий в аварийных нештатных ситуациях на железнодорожном транспорте.

Специфика аварийных нештатных ситуаций предъявляет особые требования к процессам подготовки и принятия решений:

- ситуация не имеет очевидных прецедентов, чтобы можно было использовать ретроспективный опыт для быстрого принятия решений;
- ситуация требует управления ответственностью в межведомственном масштабе и с учетом множества явных и неявных элементов воздействия;
- представление нештатной ситуации необходимо максимально целостно и быстро описать в виде набора ключевых характеристик (факторов), часть из которых носят некаузальный характер;
- должны быть обеспечены необходимые структурные условия для устойчивой сходимости процесса принятия группового решения к желаемым результатам и др.

С учетом вышеуказанных особенностей для построения механизмов координации работы групп людей, работающих в разных ведомствах, формиро-

ванию оптимальных сценариев и алгоритмов расчета динамики быстрых процессов, возникающих в технических, организационных, социально-экономических и других сферах подтягиваются возможности интеллектуальных систем поддержки решений. В результате к работе лиц, принимающих решения, уровню их профессиональной подготовки предъявляются все более высокие требования, что делает задачу формирования соответствующих знаний и умений участников реализации процессов принятия управленческих решений насущной и актуальной.

Состояние вопроса

В рамках проводимого авторским коллективом комплекса работ разработаны теоретические основы, проектные положения, требования и алгоритмы метода ускоренного согласования групповых межотраслевых управленческих решений в нестандартных аварийных ситуациях, с учетом специфики подобных ситуаций в ОАО «РЖД», на основе структуризации информации и процесса обработки данных с применением методов решения обратных задач на нечетких топологических пространствах.

Показано, что для обеспечения необходимых условий устойчивого и целенаправленного анализа аварийной ситуации целесообразно выделить компоненты: целое, порядок и хаос. Для обеспечения искомой устойчивости процессов принятия решений эти составляющие и скорости их изменения должны находиться в определенном соотношении [1].

Высказана и подтверждена гипотеза, состоящая в том, что семантическая интерпретация процесса принятия решения и генерации идей в аварийной ситуации с применением метода решения обратных задач на нечетком топологическом пространстве повысит определенность действий модератора, и, следовательно, - скорость и качество принятия решений.

Выделены проекционные плоскости и оператор, отражающие поиск решения в аварийной ситуации: пространство целей U (содержащего точную цель uT и множество неточных целей с индексом δ); пространство ресурсов и средств достижения целей Z (содержащего точное решение zT и множество неточных решений с индексом ρ); оператор отображения $A: Z \rightarrow U$. Область определения оператора A может быть сужена до подмножества F множества Z , а область значений оператора A – до некоторого подмножества множества U . Показана [2,3,4,5] плодотворность расширения метода регуляризации. Рассмотрена возможность модельной интерпретации аварийной ситуации с учетом того, что топологические пространства могут быть нечеткими.

Показано, что счетное множество, а также бесконечное множество действительных чисел, явно не под-

ходят для идентификации компонентов и описания пространства решения. Приведенный результат позволил дополнить сформированный авторами ранее [1] состав требований к структуризации данных, необходимой для повышения конвергентности (сходимости) процесса решения, а именно – состав значений параметров, характеризующих и интерпретирующих проблемную ситуацию должен быть конечен и обзорим.

Разработан метод сетевого мозгового штурма на основе логики генетического алгоритма, который может быть использован в аварийных условиях для групповой генерации идей и формирования согласованного плана действий. Разработан алгоритм достижения генетического консенсуса при проведении мозгового штурма.

Вышеозначенные методы и алгоритмы получили свою реализацию в виде специального программного обеспечения сетевой экспертно-аналитической системы «Архидока» [6], позволяющей быстро подобрать метод анализа ситуации, сформулировать и разослать вопросы экспертам, оперативно построить концептуальную модель на основе их ответов, согласованно и быстро синтезировать оптимальное управление. Основные положения по созданию сетевых экспертно-аналитических систем приведены в работе [7].

Практика внедрения экспертно-аналитической системы «Архидока» показала, что в чрезвычайных условиях критичным всегда является факт недостатка нужной информации, целостного представления ситуации на всех уровнях управления, отсутствие общей операционной картины. Причем, рост объемов данных, и, следовательно, прецедентов, далеко не всегда способствует улучшению информированности и качеству решений. Источником проблем, которые создают лакуны информации, являются сами участники команд, фокусирующиеся на решении собственных задач, неточная и запоздавшая информация о событиях. Важное место занимает аспект дефицита доверия между участниками.

В связи с этим остро встает задача формирования компетенций служащих, специалистов и экспертов в области поддержки групповых оперативных решений в аварийных условиях на железной дороге, характеризующихся наличием скрытой и неявной информации, а также малого числа косвенных признаков. Одним из вариантов решения данной задачи предлагается соответствующий групповой экспертно-аналитический тренажер.

Экспертно-аналитический тренажер

Тренажер представляет собой экспертно-аналитический технологический комплекс формирования компетенций служащих, специалистов и экспертов в области поддержки групповых оперативных решений в аварийных условиях на железной дороге, характери-

зующихся наличием скрытой и неявной информации, а также малого числа косвенных признаков. В основу создания тренажера положен теоретический базис, развитый на начальном этапе реализации настоящей работы и уже разработанное специальное программное обеспечение «Архидока». Эксплуатация тренажера преследует следующие цели:

- обеспечить формирование компетенций служащих, специалистов и экспертов в области ускоренной подготовки групповых оперативных решений в аварийных условиях на железной дороге, характеризующихся наличием скрытой и неявной информации, а также малого числа косвенных признаков;
- привить людям навыки быстрого достижения группового согласия относительно целей и путей действий на основе использования технологических средств экспертно-аналитической поддержки групповых оперативных решений в аварийных условиях на железной дороге;
- освоить подход к оценке степени согласованности принятия решений в группе участников, тем самым создав предпосылки ускорения достижения согласия в действиях участников устранения последствий аварийной ситуации.

В качестве обучаемых выступают различные участники процессов принятия решений в нештатных аварийных ситуациях: органы государственной власти, органы местного самоуправления, руководство ОАО «РЖД», диспетчеры, бригады, полиция, эксперты, население (в настоящий момент разрабатываются соответствующие механизмы краудсорсинга) и иные.

В тренинге участвует от 3-х до 7-ми человек (членов команды). В общем случае тренинг состоит из двух процедур:

- самооценка командой температуры ее стратегического риска (способность команды слаженно действовать в экстремальных условиях);
- оценка уровня согласованности экспертных оценок ситуации и построения планов действий в команде.

Первая процедура может выполняться без использования тренажера, вторая реализуется в сетевой облачной среде тренажера с применением метода парных сравнений (анализа иерархий).

Самооценка командой температуры ее стратегического риска осуществляется путем выставления оценок по дискретной шкале от 1 до 3 по всем показателям анкет:

- **Анкета 1. «Стратегическая целостность команды»:** Наличие миссии, видения, главной цели; Доверие к команде руководства и соратников; Имидж, репутация команды и другие показатели.
- **Анкета 2. «Дух команды»:** Статус нематериальных ценностей; Собственное научное развитие; Корпоративная культура и другие показатели.

- **Анкета 3. «Управленческий порядок в команде»:** Планирование действий; Организационное структурирование; Система мотивации и другие показатели. Каждая анкета содержит 8 вопросов и 3-балльную шкалу, где значение 1 соответствует самому низкому значению характеристики, а значение 3 – наивысшему. В процессе проставления оценок члены команды самостоятельно приходят к согласию относительно оценки по каждому показателю приведенных анкет. После получения оценочных характеристик от всех членов команды проводится расчет температуры стратегического риска команды по формуле:

$$\begin{aligned} \text{Температура} = & \text{Кол-во оценок «1» для всех анкет} * 1,666 + \\ & + \text{Кол-во оценок «2» для всех анкет} * 1,595 + \\ & + \text{Кол-во оценок «3» для всех анкет} * 1,525 \end{aligned} \quad (1)$$

Нормальным считается значение температуры до 36,9 градусов (как у человека). Если температура стратегического риска ненормальная, то команду надо «лечить». Для этого следует по каждому пункту команде провести соответствующую исследовательскую и подготовительную работу.

Вторая процедура применяется для освоения навыков достижения согласованности экспертных оценок ситуации. Метод анализа иерархий является систематической процедурой для иерархического представления элементов, определяющих суть исследуемой проблемы. Метод состоит в декомпозиции проблемы на более простые составляющие части (построение иерархии элементов) и дальнейшей обработке последовательности суждений лиц, принимающих решения на основе парных сравнений. В результате определяется относительная степень важности элементов в сформированной иерархии, выраженная численно.

Процесс реализации процедуры с использованием метода анализа иерархий состоит в последовательном выполнении 2-х этапов работ.

Этап 1. Постановка проблемы и ее представление в виде иерархии элементов, начиная с вершины (цель), через промежуточные уровни (характеристики, от которых зависят последующие уровни – подцели) к самому нижнему уровню (перечень альтернатив – мероприятий). В качестве основного примера может быть рассмотрена структура мероприятий по организации аварийно-восстановительных работ на железных дорогах:

Главная цель G_1 – Быстрейшее открытие прерванного движения поездов при минимизации ущерба от последствий железнодорожного транспортного происшествия.

Подцель E_1 – Оперативное информирование ответственных лиц о ЖТП.

Мероприятия:

- A_{11} Предварительный осмотр места схода и сбор информации о произошедшем ЖТП.
 - A_{12} Уведомление причастных лиц о ЖТП в ОАО «РЖД» согласно утвержденной схеме оповещения.
 - A_{13} Информирование о происшествии территориального органа ФСБ России, штаба ЧС.
 - A_{14} ...
- Подцель E_2 - Минимизация последствий ЖТП до прибытия восстановительных поездов.

Мероприятия:

- A_{21} Закрытие перегона с ЖТП для движения поездов и прекращение отправления поездов на закрытый перегон, при возможности пропуск поездов по смежным путям.
- A_{22} Определение объема и характера повреждений: подвижного состава, устройств СЦБ и связи, контактной сети и воздушных линий электропередач.
- A_{23} Организация каналов связи с местом происшествия, создание на месте временного поста связи, подключение телефонных аппаратов и проверка качества связи с поездным диспетчером, управлением железной дороги и ОАО «РЖД».
- A_{24} ...
- и т.д. для всех подцелей главной цели G_1 .

Этап 2. Состоит из двух подэтапов:

- 2.1. Проведение членами команды парного сравнения элементов одного уровня иерархии по отношению к вышестоящим элементам с использованием шкалы относительной важности. В соответствии с ней при сравнении двух элементов в качестве оценки берется одно из чисел в интервале от 1 до 9, в случае предпочтения первого, либо обратная величина в случае предпочтения второго. Конкретное значение характеризует степень предпочтения. Если считается, что объекты одинаковы, то обоим ставится единица. В итоге, формируются квадратные матрицы парных сравнений.
- 2.2. Для каждой построенной матрицы парных сравнений вычисляются компоненты собственного вектора. Далее они нормируются, что дает вектор приоритетов или весов объектов. После проведения всех парных сравнений и получения данных по собственному значению и собственному вектору определяется уровень согласованности экспертных оценок ситуации и построения планов действий в команде. Для этого, используя отклонение максимального собственного числа от размерности матрицы, рассчитывается величина, называемая индексом согласованности. Полученное значение сравнивается с соответствующим индексом, полученным для ма-

трицы, построенной случайным образом, что и составляет отношение согласованности. Приемлемым является отношение согласованности не более 10%.

Если отношение согласованности превышает 10%, то в команде присутствует значительное расхождение во мнениях по оценке ситуации и принимаемых управленческих решениях. В этом случае с командой необходимо провести соответствующую исследовательскую и подготовительную работу.

Заключение

Принятие решений в аварийных ситуациях характеризуется дефицитом времени и ресурсов, неопределенностью, обратным характером решаемых задач, межотраслевым взаимодействием, многоаспектной компетенцией участников принятия решений и необходимостью обеспечения быстрого группового согласия относительно целей и путей действий. Разрабатываемый экспертно-аналитический тренажер, сочетающий в себе преимущества визуализации, инструментария ситуационной осведомленности и виртуального экспертного сотрудничества, когнитивного моделирования, решения обратных задач, сетевой экспертизы и краудсорсинга, позволит обеспечить успешное решение задачи формирования компетенций служащих, специалистов и экспертов в области поддержки групповых оперативных решений в аварийных условиях на железной дороге.

Литература

1. Райков А.Н. Конвергентное управление и поддержка решений. - М.: Издательство ИКАР, 2009. - 245 с.
2. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. Учебное пособие для вузов. Изд. 3-е, исправленное М.: Наука. Гл. ред. физ.-матлит, 1986. - 288 с.
3. Иванов В.К. Некорректные задачи в топологических пространствах // Сибирский математический журнал. Т. X, № 5, 1969. с. 1065 -1074
4. Goguen J.A. The fuzzy Tychonoff Theorem // Math. and Application. 1973. Vol. 43. P. 734-742.
5. Raikov A.N. Holistic Discourse in the Network Cognitive Modeling // Journal of Mathematics and System Science. 2013. Vol. 3, No. 10. P. 519-530.
6. «Специальное программное обеспечение «Сетевая экспертно-аналитическая система «Архидока». Свидетельство о государственной регистрации программ № 2011613934 от 29 марта 2011 г. - М.: Роспатент.
7. Gubanov, D., Korgin, N., Novikov, D., Raikov, A. E-Expertise: Modern Collective Intelligence, Springer. Series: Studies in Computational Intelligence, Vol. 558, 2014, XVIII, 112 p.

Корниенко А. А. , Диасамидзе С. В. , Глухарев М. Л. ,
Захарченко С. С. , Поляничко М. А., ПГУПС, г. Санкт-Петербург

Разработка методологии, методического и программно-алгоритмического обеспечения процессов обнаружения и разрешения конфликтов в комплексах программных средств защиты от кибератак на железнодорожном транспорте

Широкое применение информационных технологий, внедрение информационных, информационно-управляющих и автоматизированных систем (ИИУАС) в различных сферах деятельности ОАО «РЖД», комплексов программно-аппаратных средств обеспечения их информационной безопасности и защиты от кибератак требует решения проблемы обнаружения и разрешения конфликтного взаимодействия программных средств на железнодорожном транспорте.

Эта проблема связана с проявлением противоречия между необходимостью обеспечения бесконфликтного взаимодействия программных средств защиты информации (ПСЗИ) при их комплексном использовании, а также комплексов ПСЗИ и программного обеспечения (ПО) ИИУАС, и недостаточностью существующих методов и инструментальных средств обнаружения и анализа конфликтов, специфичных для ПСЗИ. Она также обусловлена малой детализацией информации об обнаруженных конфликтах во встроенных средствах журналирования событий в операционных системах, большой сложностью ручного поиска и анализа конфликтов между отдельными средствами комплекса ПСЗИ и между ПСЗИ и ПО ИИУАС и другими факторами.

Для решения данной проблемы авторами предлагается оригинальная методология обнаружения и разрешения конфликтного взаимодействия ПСЗИ и программных объектов ИИУАС, которая базируется на парадигме определения их «потенциальной» (логической) конфликтности, связанной с «предрасположенностью» ряда ПСЗИ к «агрессии» по отношению к другим программным средствам и системам, и распознавания реального конфликта с учетом нежелательных последствий (снижение производительности программной системы, сбой в работе ПСЗИ и ПО, нарушение динамической корректности работающего ПО и потеря функциональности, появление уязвимостей и нарушение безопасности).

Методология также основывается:

- на выборе в качестве обобщенного показателя производительность (быстродействие) ИИУАС – интегральной характеристики, наиболее отражающей

влияние ПСЗИ на функционирование ИИУАС и чувствительной к конфликтному взаимодействию;

- на формировании совокупности правил и критериев - логических правил определения степени «потенциальной» конфликтности ПСЗИ, нечетких правил выявления нежелательных последствий (снижения производительности) и обнаружения конфликта (определения состояния конфликтности), критерия распознавания конфликта (классификации вида конфликта - определения программного средства защиты и программного объекта возникновения конфликта), правил и критериев разрешения конфликтов – и формализации процедур для максимально возможной автоматизации процессов;
- на создании единого методического обеспечения процессов обнаружения, распознавания (классификации), разрешения и предотвращения конфликтов на этапе эксплуатации как процессов управления событиями и инцидентами информационной безопасности.

Отметим, что программную систему образует любое программное обеспечение ИИУАС, в том числе ПСЗИ, функционирующие как целостный комплекс взаимосвязанных и взаимодействующих программных компонентов в некоторой программной среде, которую образуют программные компоненты, непосредственно не включаемые в рассматриваемую систему, но при этом оказывающие влияние на изменение её свойств или изменяющие собственные свойства под воздействием компонентов системы.

Для обнаружения и распознавания конфликтов между ПСЗИ и выбранными объектами ИИУАС разработана методика обнаружения конфликтов в комплексе ПСЗИ и между ПСЗИ и ПО ИИУАС. Суть методики состоит в создании теоретико-множественных моделей конфликтного взаимодействия и формировании логических правил определения степени «потенциальной» конфликтности ПСЗИ, в выборе показателей и обобщенного показателя, создании лингвистических переменных, формирования базы нечетких правил и решении задачи классификации на основе дискрими-

нантного анализа.

Определение степени «потенциальной» конфликтности комплекса ПСЗИ возможно только при наличии адекватной модели, которая описывает программную систему (ПС) и элементы с потенциально конфликтным взаимодействием. Для этого разработаны теоретико-множественные модели конфликтного взаимодействия ПСЗИ и следующих программных объектов (объектов возникновения конфликтного взаимодействия) ИИУАС – динамических библиотек DLL; ключей реестра операционных систем; конфигурационных файлов ПСЗИ – и логические правила определения степени их «потенциальной» конфликтности. Под степенью потенциальной конфликтности понимается численное значение, возвращенное одним из сформированных логических правил.

В качестве примера здесь приведено логическое правило для определения степени потенциальной конфликтности между ПСЗИ и используемыми ими динамическими библиотеками, которое имеет вид:

$$DLLConflict = \begin{cases} \psi_{L1}, \forall i, j: func_i \in SZIfunc \equiv func_j \in DLL; \\ \psi_{L2}, \exists i, j: (func_i \in SZIfunc \wedge rettype \in func_i \neq func_j \in DLL \wedge \\ \wedge rettype \in func_j) \wedge (func_i \in SZIfunc \wedge name \in func_i = \\ = func_j \in DLL \wedge name \in func_j); \\ \psi_{L3}, \exists i, j, k: (func_i \in SZIfunc \wedge param_k \in func_i \neq \\ \neq func_j \in DLL \wedge param_k \in func_j) \wedge (func_i \in SZIfunc \wedge \\ \wedge name \in func_i = name \in func_j \wedge func_j \in DLL); \\ \psi_{L4}, \exists i, j: func_i \in SZIfunc \wedge func_j \notin DLL. \end{cases}$$

где

$\Psi_L \{ \psi_{L1}, \psi_{L2}, \psi_{L3}, \psi_{L4} \}$ – множество различных численных значений, характеризующих степень конфликтности функций DLL;

ψ_{L1} – конфликта нет,

функции полностью эквивалентны;

ψ_{L2} – функция существует,

но не совпадает возвращаемый тип;

ψ_{L3} – функция существует,

но не совпадает набор параметров;

ψ_{L4} – вызываемая функция

отсутствует в библиотеке.

Для обнаружения реального конфликта в качестве обобщенного показателя выбран показатель снижения производительности программной системы, а также сформирован набор показателей, прежде всего показателей быстродействия, максимально чувствительных к изменениям производительности анализируемых ресурсов системы. В целях обеспечения максимальной независимости от аппаратной части компьютерной системы, требовалось подобрать низкоуровневые показатели, универсальные для современных архитектур. В качестве примера при описании методики выделяются показатели, характеризующие работу процессора, оперативной памяти и жесткого диска, для последующего формирования на их основе обобщенного показателя

снижения производительности ПС.

Для обнаружения реального конфликтного взаимодействия ПСЗИ и объектов ИИУАС, связанного с характеристикой снижения производительности, используются нечеткие множества и лингвистические переменные, поскольку: лингвистические переменные позволяют оперировать непрерывно изменяющимися во времени динамическими входными данными; есть возможность перехода к единой качественной шкале измерений; возможно проведение качественной оценки как входных данных, так и выходных результатов.

Необходимым условием является создание лингвистических переменных для последующей обработки вида $\langle \hat{a}, T, X, G, M \rangle$, где

\hat{a} – имя лингвистической переменной;

T – множество значений, которые представляют

собой имена нечетких переменных (базовое термножество лингвистической переменной), областью определения каждой переменной является множество X ;

G – синтаксическая процедура, позволяющая оперировать элементами термножества T и создавать новые термы (значения).

Множество $T \cup G(T)$, где

$G(T)$ – множество полученных термов, называется расширенным термножеством лингвистической переменной;

M – математическое правило, определяющее класс функции принадлежности для значений из множества T .

Алгоритмы нечеткого вывода позволяют просто и быстро менять модель поведения и реагирование на изменение показателей, добавляя или изменяя правила вывода. При добавлении нового правила задаются термы и функции принадлежности для соответствующей новой лингвистической переменной и правила, администратор должен задать значения по всем переменным.

Создание базы нечетких правил для выявления снижения производительности как обобщенного показателя и последующего обнаружения реального конфликта подразумевает составление множеств условий для определения результирующего значения.

Каждая база нечетких правил задается в виде

$$R^{(k)} : \text{IF} \left(\begin{matrix} var_1 \text{ это } A_1^k \text{ AND} \\ var_2 \text{ это } A_2^k \dots \text{ AND} \\ var_n \text{ это } A_n^k \end{matrix} \right) \text{ THEN} \left(\begin{matrix} res_1 \text{ это } y_1^k \text{ AND} \\ res_2 \text{ это } y_2^k \dots \text{ AND} \\ res_m \text{ это } B_m^k \end{matrix} \right)$$

где N – количество нечетких правил;

A_i^k – нечеткие множества $A_i^k \subseteq VAR_i \subset R, i = 1, \dots, n$;

B_j^k – нечеткие множества $B_j^k \subseteq RES_j \subset R, j = 1, \dots, m$;

$var_1, var_2, \dots, var_n$ – входные лингвисти-

ческие переменные и $(var_1, var_2, \dots, var_n)^T = var \in VAR_1 \times VAR_2 \times \dots \times VAR_n$;

$res_1, res_2, \dots, res_n$ – выходные лингвистические переменные и $(res_1, res_2, \dots, res_n)^T = res \in RES_1 \times RES_2 \times \dots \times RES_m$.

Процесс обработки нечетких правил вывода в управляющей системе состоит из четырех этапов:

- 1) Вычисление степени истинности левых частей правил (между «если» и «то») — определение степени принадлежности входных значений нечетким подмножествам, указанным в левой части правил вывода.
- 2) Модификация нечетких подмножеств, указанных в правой части правил вывода (после «то»), в соответствии со значениями истинности, полученными на первом этапе.
- 3) Объединение (суперпозиция) модифицированных подмножеств.
- 4) Скаляризация результата суперпозиции — переход от нечетких подмножеств к скалярным значениям.

Результат выполнения правила – нечеткое множество. Говоря более строго, происходит ассоциирование переменной и функции принадлежности, указанной в правой части правила.

Выходы всех правил вычисляются нечеткой управляющей системой отдельно, однако, в правой части нескольких из них может быть указана одна и та же нечеткая переменная. При определении обобщенного результата необходимо учитывать все правила, для этого система производит суперпозицию нечетких множеств. Эта операция называется нечетким объединением правил вывода. Два нечетких подмножества, получаемые при выполнении этих правил, должны быть объединены управляющей системой.

Для обнаружения конфликтного взаимодействия ПСЗИ и объектов ИИУАС результаты определения степени «потенциальной» конфликтности, полученные на основе логических правил, и результаты последовательного применения баз нечетких правил объединяются в вектор состояния системы $L = \{PerfConflict, DLLConflict, IniConflict, RegConflict\}$. Каждый компонент вектора состояния системы отражает наличие конфликтного взаимодействия ПСЗИ и ИИУАС в выбранных программных объектах возникновения конфликта – в реестре, динамических библиотеках и конфигурационных файлах. В вектор состояния системы также записывается обобщенный показатель текущей производительности. Так как все значения получены из системы нечеткого вида, то значения всех элементов вектора лежат в промежутке от 0 до 1. Чем ближе значение элемента вектора L к 1, тем сильнее конфликтное взаимодействие ПСЗИ в ИИУАС.

На последнем шаге методики на основе критерия превосходства проводится распознавание конфлик-

та – классификация вектора состояния ПСЗИ ИИУАС, то есть определение конфликтующего программного средства защиты и программного объекта возникновения конфликта. Для решения этой задачи используется дискриминантный анализ, проведение которого условно делится на два этапа. На первом этапе выявляются и формально описываются различия между наблюдаемыми объектами, на втором этапе происходит классификация новых объектов и их отнесение к одной из нескольких групп.

Разработанное методическое и программно-алгоритмическое обеспечение позволило создать прототип автоматизированной системы оперативного обнаружения и распознавания конфликтов на этапах внедрения и эксплуатации комплексных программных средств защиты от кибератак в ИИУАС (рис. 1), а также дало возможность разрабатывать эффективные алгоритмы для автоматизации процессов разрешения и предотвращения конфликтов.

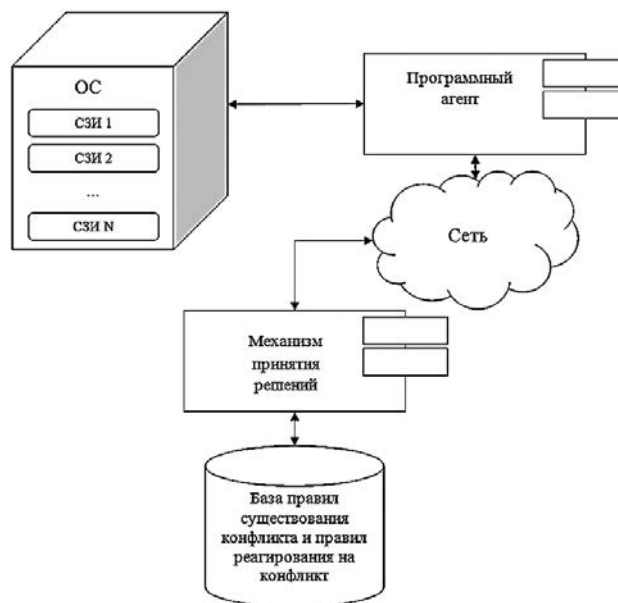


Рис.1.

При этом дальнейшее развитие методологии и единого методического обеспечения процессов обнаружения, распознавания (классификации), разрешения и предотвращения конфликтов на этапе эксплуатации осуществляется в рамках процессов управления событиями и инцидентами информационной безопасности. Это предусматривает использование как организационных мер, так и технических решений в плане автоматизации процессов разрешения конфликтов, связанных с перенастройкой, отключением, заменой, изменением окружения ПСЗИ, а также с виртуализацией.

Для автоматизированного устранения причин и

последствий конфликтов разработан ряд формальных правил разрешения конфликтов ПСЗИ в ИИУАС.

Разрешение выявленного конфликта автоматизировано, например, при обнаружении конфликта динамических библиотек (модуль разрешения конфликтов может автоматически осуществить загрузку или перемещение необходимой библиотеки или, в случае неудачи, выдать информационное сообщение). Для предотвращения возникновения конфликтных ситуаций при попытке модификации связанной с ПСЗИ динамической библиотекой, модуль разрешения конфликта блокирует потенциально опасные действия и сообщает о них оператору. Снижение быстродействия одного из компонентов ИИУАС или снижения ее производительности используется для остановки одного из конфликтующих ПСЗИ. Отключение одного из ПСЗИ может оставить систему без защиты, и поэтому для разрешения конфликта и сохранения хотя бы частичной защищенности следует рассматривать возможность отключения отдельных модулей ПСЗИ или введение очереди приоритетов на отключение ПСЗИ.

Включенный в автоматизированную систему механизм разрешения конфликтов в фоновом режиме осуществляет мониторинг за общим использованием системных ресурсов и/или использованием системных ресурсов отдельным ПСЗИ. Непосредственно функция разрешения конфликтов активизируется в случае, если в контрольной временной точке появляются данные о превышении критических уровней показателей

использования системных ресурсов и продолжительности работы системы. При этом выполняется подробный анализ информации о программной конфигурации (для определения конфликтующих запущенных ПСЗИ), по результатам которого происходит изменение настроек ПСЗИ для удаления вмешательства в работу конфликтующих приложений. Для корректировки настроек ПСЗИ в качестве шаблонов используется информация об известных конфликтующих приложениях и правила разрешения конфликтов из соответствующей базы данных.

Литература

1. Корниенко А.А., Глухарев М.Л., Диасамидзе С.В., Захарченко С.С., Поляничко М.А. Системный анализ проблемы конфликтологии и методическое обеспечение процессов обнаружения и распознавания конфликтов в программных средствах защиты от кибератак». // **«Интеллектуальные системы на транспорте»**: сборник материалов III международной научно-практической конференции «ИнтеллектТранс-2013». – СПб.: ПГУПС, 2014. – С. 203 – 209.
2. Поляничко М.А., Корниенко А.А. Методика автоматизированного обнаружения конфликтов в комплексе программных средств защиты информации // *Естественные и технические науки*. – М.: Спутник+, 2013. – Вып. 1 (63). – С. 327 – 334.

Шухина Е.Е., Кисельгоф Г.К., Астрахан В.И., Попов П.А., ОАО «НИИАС», г. Москва

Методы и технические средства обмена оперативной информацией между центрами управления ИСУЖТ и бортовыми устройствами управления и безопасности

В статье рассматриваются задачи и функции технологической подсистемы управления и обеспечения безопасности движения (далее СУОБД) в составе Единой интеллектуальной системы управления и автоматизации производственных процессов на железнодорожном транспорте (ИСУЖТ) по повышению безопасности движения, оперативности управления и точности выполнения графика движения поездов. Решение перечисленных задач базируется на использовании значительного объема передаваемой по каналам цифровой радиосвязи первичной информации между центрами управления ИСУЖТ/ПТК ИСУЖТ и интеллектуальными бортовыми комплексами (ИБК), в первую очередь, содержащейся в передаваемых на поезда актуальных суточных вариантных графиках движения (СВГД).

В состав ИБК входит комплексное локомотивное устройство безопасности унифицированное (далее КЛУБ-У) и бортовое радиосигнальное устройство связи (далее БРУС), посредством которого осуществляется взаимодействие с ПТК ИСУЖТ/центрами управления через сети технологической ремонтно-оперативной радиосвязи ОАО «РЖД» (РОРС) на базе подвижной радиотелефонной связи стандарта GSM.

Основной функцией устройства БРУС является обеспечение взаимодействия с стационарным оборудованием ПТК ИСУЖТ.

Объектами автоматизации на опытных участках внедрения СУОБД: Санкт-Петербург – Бусловская и Санкт-Петербург – Москва Октябрьской ж.д., является технологический процесс управления и обеспечения безопасности движения электропоездов «Аллегро» и пассажирских электропоездов ЧС-6.

В настоящее время обеспечение безопасности и управление поездами на борту осуществляется с использованием бортовых комплексов КЛУБ-У, БЛОК, САУТ, САВП, ТСКБМ и их модификаций. Однако эти комплексы не позволяют автоматически в реальном режиме времени обеспечивать поездного диспетчера оперативной информацией о точном местоположении поездов и параметрах их движения, а также передавать машинистам информацию об актуальном графике движения. Поэтому были определены основные задачи автоматизации технологического процесса:

- оперативное обеспечение ИСУЖТ необходимым объемом первичной информации для принятия решений при возникновении конфликтных ситуаций;

- оперативная передача локомотивным бригадам актуальных графиков/расписаний движения с целью повышения точности выполнения графика и экономии расхода энергоресурсов на тягу поездов.

Взаимодействие компонентов технологической подсистемы управления и обеспечения безопасности движения (далее СУОБД), частью которой являются ИБК, осуществляется в соответствии со схемой, представленной на рисунке 1.

Взаимодействие между устройствами КЛУБ-У и БРУС в составе ИБК осуществляется через CAN-интерфейс, а отображение информации для машинистов производится на жидкокристаллическом блоке индикации типа БИЛ-М

Информация от ИБК через сеть РОРС GSM поступает на сервер сбора навигационных данных (ССНД), для повышения надежности работы которого используется 100% резервирование программно-аппаратных средств.

ИБК устанавливается на подвижном составе и взаимодействует через сервер сбора навигационных данных (ССНД) с сервером сопряжения ПТК ИСУЖТ.

ИБК состоит из:

- 1) устройства безопасности КЛУБ-У, обеспечивающего:
 - формирование информации для передачи на стационарное оборудование ПТК ИСУЖТ;
 - обработку данных, полученных от ПТК ИСУЖТ;
 - отображение для машиниста на локомотивном блоке индикации оперативной информации, поступающей с ПТК ИСУЖТ;
- 2) универсального блока радиосвязи (БРУС), который обеспечивает взаимодействие с ПТК ИСУЖТ через сеть РОРС GSM между ССНД и ИБК.

ИБК выполняет следующие функции:

- формирование и передачу в ПТК ИСУЖТ информации о номере поезда, его местоположении и параметрах его движения с частотой передачи сообщений не более 5секунд;
- обработку сообщений и данных об актуальном ГДП/расписании, полученных от ПТК ИСУЖТ; данные передаются автоматически с заданной периодичностью в момент установления связи;
- отображение на блоке индикации локомотива информации о ГДП/расписании.

ССНД подключается к сети передачи данных ОАО «РЖД» (СПД) и через сеть РОРС GSM взаимодейству-

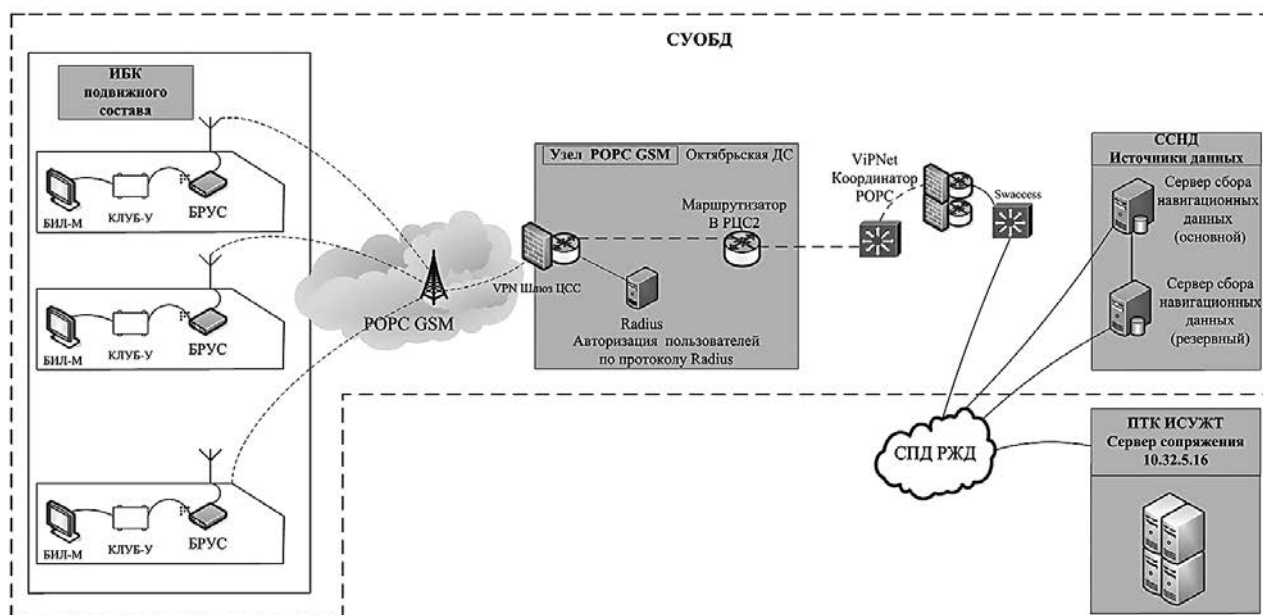


Рисунок 1. Схема взаимодействия ИБК подвижного состава с сервером сопряжения ПТК ИСУ ЖТ

ет с бортовыми устройствами. Взаимодействие осуществляется в режиме пакетной передачи данных.

ССНД выполняет следующие функции:

1. подключение к сети передачи данных ОАО «РЖД» (СПД) в Санкт-Петербургском ИВЦ;
2. взаимодействие с оборудованием сети РОРС GSM;
3. сбор и хранение информации о текущем местоположении подвижного состава, оборудованного ИБК;
4. сбор и хранение информации о подвижном составе, получаемой от ИБК;
5. организация взаимодействия с сервером сопряжения ПТК ИСУЖТ при приеме и передаче данных на подвижном составе, оборудованном ИБК.

На данном этапе установка ИБК выполняется на:

- четырех скоростных электропоездах «Аллегро» компании;
- «Oy Karelian Trains Ltd», эксплуатирующихся на участке Санкт-Петербург–Бусловская Октябрьской ж.д.;
- двух электровозов ЧС-6 Октябрьской дирекции тяги, эксплуатирующихся в пассажирском движении на участке Санкт-Петербург–Москва Октябрьской ж.д.

Комплекс КЛУБ-У в составе ИБК, дополнительно к выполняемым штатным функциям по обеспечению безопасности движения поезда на базе программного обеспечения пакета 8.1.1 обеспечивает:

- реализацию протоколов взаимодействия с устройством БРУС, по локальной шине CAN интерфейса;
- формирование для трансляции в ПТК ИСУЖТ со-

- общений о железнодорожной координате поезда;
- формирование для трансляции в ПТК ИСУЖТ сообщений с данными параметров движения поезда (№ поезда, номер локомотива, допустимая скорость, фактическая скорость, целевая скорость, название впереди лежащей цели, показание локомотивного светофора, положение ключа ЭПК, состояние ЭПК, состояние машиниста и др.);
- индикацию информации от ПТК ИСУЖТ о ГРД/расписании (название станции, время прибытия, время отправления).

Взаимодействие ИБК с другими бортовыми системами, устройствами и компонентами осуществляется через CAN-интерфейс по протоколу канального уровня CAN2.0A со скоростью передачи данных 25 кБит/с.

Индикации в ИБК наличия связи с ПТК ИСУЖТ выполняется с помощью отдельного сигнального индикатора.

Отображение в ИБК информации о времени прибытия и отправления по двум ближайшим станциям осуществляется посредством вывода на блок индикации таблицы с данными для двух ближайших по ходу движения поезда станций, содержащей краткое наименование станции, времени прибытия и времени отправления со станции.

БРУС в составе ИБК выполняет следующие функции:

- реализацию протоколов взаимодействия с КЛУБ-У по локальной шине CAN-интерфейса;
- реализацию протоколов взаимодействия с ССНД по цифровым радиоканалам с обеспечением информационной безопасности посредством использования программного обеспечения VIPNET;

- обработку информации о ГДП, передаваемой по цифровым радиоканалам;
- считывание параметров поезда и параметров его движения, включая номер поезда, номер локомотива, номер пути, скорость движения поезда, железнодорожную координату и текущее время, а также передачу этой информации по цифровым радиоканалам.

Для реализации протоколов взаимодействия БРУС и ССНД по цифровым радиоканалам в качестве транспортной сети используется система передачи данных технологической ремонтно-оперативной радиосвязи РОРС GSM, в которой соединение абонентов осуществляется в соответствии с PPP протоколом и обязательной авторизацией по «Логину», «Паролю» и «Номеру вызывающего».

Функция обработки в БРУС информации, передаваемой по цифровым радиоканалам о ГРД, выполняется следующим образом:

- БРУС непрерывно отслеживает текущие время, координаты местонахождения, названия проследованных станций и направление следования поезда по сообщениям ИБК, передаваемым в CAN-интерфейс;
- на основании отслеживаемой информации и информации о ГДП, полученной по цифровым радиоканалам от ССНД, БРУС рассчитывает и передает в ИБК по CAN-интерфейсу данные о времени прибытия и отправления поезда по двум ближайшим станциям и текущее отклонение от нормативного суточного графика движения.

Функция БРУС, включающая периодическое считывание параметров поезда и параметров его движения, а также передачу этой информации по цифровым радиоканалам, выполняется следующим образом:

БРУС непрерывно отслеживает изменения в параметрах поезда и параметрах его движения по сообщениям ИБК, передаваемым в CAN-интерфейс, и с заданной периодичностью транслирует эти данные в ССНД по цифровому радиоканалу.

В ИБК предусматривается возможность подключения к различным радиосетям (160 МГц, GSM, GSM-R, DMR) приема и передачи данных. Обмен информацией между ИБК и ПТК ИСУЖТ производится в защищенном от несанкционированного вмешательства режиме.

Для защиты информации, передаваемой в сети РОРС GSM, ССНД, прием и передача данных выпол-

няется через ViPNet Координатор, установленный в УДИС Санкт-Петербургского ИВЦ.

Весь трафик, передаваемый между ИБК и ПТК ИСУЖТ, защищается средствами криптографической защиты, сертифицированными в ОАО «РЖД».

ПО ИБК обеспечивает автоматизированное выполнение всех заданных функций в реальном масштабе единого времени с другими взаимодействующими техническими средствами.

Важное значение при решении рассматриваемой задачи имеет оценка времени передачи сообщений между бортовыми устройствами и центром управления ИСУЖТ, основывается на алгоритме, который определяет разницу между меткой времени в полученном сообщении и временем на сервере. Метка времени в сообщении, формируемом бортовым устройством, получается на основе данных о времени, полученных от спутникового навигатора. Время на сервере синхронизируется на основе специального сетевого протокола NTP (Network Time Protocol), использующего для своей работы UDP. Данный протокол чрезвычайно устойчив к изменениям латентности среды передачи. Синхронизация времени на основе описанных средств осуществляется с точностью до 1 мс, что достаточно для расчета времени передачи сообщений, составляющего десятки и сотни миллисекунд.

Достоверность передаваемой информации обеспечивается циклическим избыточным кодом CRC 32. Для оценочных целей можно считать вероятность не выявленной ошибки в случае использования CRC при наличии ошибки, равной $(1/2)^r$, где r – степень образующего полинома. Тогда при применении кода CRC32 вероятность получения недостоверных данных при передаче телеграмм длиной 52 байта составляет $\sim 2,3 \times 10^{-10}$, что достаточно для применения в управляющих системах.

Усредненное время доставки сообщения местоположения подвижной единицы размером 52 байта через сеть РОРС РЖД с использованием криптографических средств ViPNet в разных режимах подключения к цифровому каналу (при различных видах пакетной связи) составляет для: GPRS – 900 мсек; EDGE – 500 мсек; WCDMA – 240 мсек; HSDPA – 160 мсек; HSDPA_DL – 120 мсек; HSDPA_PLUS_HSUPA – 140 мсек; HSDPA_PLUS_64QAM – 120 мсек; HSDPA_PLUS_WCDMA – 70 мсек; LTE – 35 мсек.

Юренко К.И., Ростовский государственный университет путей сообщения
 Савоськин А.Н., Московский государственный университет путей сообщения
 Фандеев Е.И., Южно-Российский государственный политехнический университет

Исследование оптимальных траекторий движения поездов с учетом влияния случайных факторов

При решении многих задач, связанных с повышением безопасности и энергоэффективности железнодорожного транспорта, осуществляется расчет режимов ведения поезда по заданному участку в соответствии с графиком. К их числу относятся: совершенствование систем автоматизированного ведения грузовых, пассажирских и пригородных поездов, а также поездов метрополитена; разработка маршрутных карт машиниста; создание тренажеров, а также проведение научных исследований в области оптимального управления движением транспортных средств. Решение таких задач обычно связано с поиском траектории движения поезда и выполнением тягово-энергетических и тормозных расчётов в соответствии с правилами тяговых расчётов для поездной работы (ПТР), в основе которых лежат эмпирические зависимости сил тяги, торможения, основного, дополнительного и добавочного сопротивлений движению при различных режимах движения подвижного состава [1]. Под траекторией движения понимается кривая, характеризующая движение поезда в плоскости координат «скорость-время» или «скорость-путь» [2].

При вычислении оптимальной траектории, в частности, по критерию минимума перевозочных затрат или расхода электроэнергии на тягу при заданном времени хода используются методы классического вариационного исчисления, принцип максимума Л.С. Понтрягина, а также различные варианты динамического программирования Беллмана или метод целевой функции [3-6]. Они условно могут быть разделены на аналитические и численные.

Первые (вариационное исчисление, принцип максимума, метод целевой функции) позволяют на основе разработанного математического аппарата определить параметры оптимальной траектории, такие как скорость стабилизации, координата перехода на выбег, скорость начала торможения с учетом некоторых допущений относительно модели объекта управления. Вторая группа (на основе метода динамического программирования) позволяет, используя тяговый расчёт, найти оптимальную траекторию с учетом конкретных параметров модели объекта управления и участка движения, что требует, однако, существенно большего объема вычислений.

Для исследования оптимальных траекторий, а также решения более широкого класса задач, связанных с совершенствованием систем автоматического управления электроподвижного состава железных дорог, обычно используется метод имитационного моделирования с математической моделью движения поезда [7]. Однако известно, что фактические параметры движения поезда могут существенно отличаться от расчётных, получаемых на основе ПТР. Это связано, например, с техническим состоянием подвижного состава, разбросом характеристик тяговых двигателей, верхнего строения и состояния железнодорожного пути, неравномерным износом бандажей колесных пар, колебаниями напряжения в контактной сети, наличием ветра (его скоростью и направлением), пониженной температурой, различной загрузкой вагонов пассажирами и грузами, а также рядом других менее существенных факторов [8].

На практике при реализации бортовых систем автоведения обычно использовались аналитические модели определения оптимальных режимов движения, а компенсация отклонений от оптимальной траектории осуществлялась путем периодического пересчёта её параметров. Вместе с тем, для дальнейшего совершенствования таких систем, а также методов оптимального управления движением поездов, актуальной является задача оценки влияния возможного отклонения значений указанных факторов, на показатели оптимальности расчётных режимов движения поезда, таких как увеличение времени хода и перерасход электроэнергии на тягу.

Рассмотрим известное основное уравнение движения [1,8], лежащее в основе математической модели движения поезда, и выделим основные параметры такой модели. В общем случае такое уравнение записывается в виде

$$v \frac{dv}{ds} m(1 + \gamma) = F - W - B,$$

где v , s – скорость и путь; m – масса поезда; γ – коэффициент, учитывающий инерцию вращающихся частей; F – сила тяги; W – сопротивление движению; B – сила торможения. Основные параметры, характеризующие траекторию движения поезда – время хода t и расход электроэнергии A , определяются по следующим соотношениям:

$$t = \int_{s_0}^{s_k} \frac{ds}{v(s)}; A = \int_{s_0}^{s_k} \frac{F}{\eta_\phi} ds,$$

где S_0 и S_k – начальная и конечная координаты пути. При использовании рекуперативного торможения расход электроэнергии записывается в виде

$$A = \int_{s_0}^{s_k} \left(\frac{F}{\eta_m} - R \cdot \eta_p \right) ds,$$

где R – сила рекуперативного торможения, являющаяся (наряду силой пневматического торможения B_p) одной из составляющих тормозной силы $B=B_p+R$;

η_m и η_p – к.п.д. тягового привода в режимах тяги и рекуперации соответственно.

В качестве инструмента исследования будем использовать программное обеспечение для проведения вычислительного эксперимента, рассмотренное в [9], которое позволяет изменять параметры математической модели и получать результаты для заданного их сочетания.

Основные параметры, определяющие характер движения поезда, запишем в виде вектора:

$$X = \left\{ \begin{array}{l} m, F(v), B_p(v, P_{bc}), R(v), \\ \eta_m(v), \eta_p(v), W_o(v), W_i(s), \\ W_\phi(v, \Pi), s_0, s_k, v_0, v_{\max}(s) \end{array} \right\}^T$$

где P_{bc} – давление в тормозных цилиндрах; $W_o(v)$, $W_i(s)$, $W_\phi(v, \Pi)$ – соответственно основное сопротивление движению, определяемое по эмпирическим зависимостям, рекомендованным ПТР и обусловленное в основном трением в подшипниках подвижного состава, взаимодействием колесных пар с рельсами и сопротивлением воздушной среды при отсутствии ветра; дополнительное сопротивление движению, определяемое планом и профилем пути; добавочное сопротивление движению, связанное с отклонением параметров основного сопротивления движению от усредненных значений, физически определяемым такими факторами как ветер, пониженная температура окружающей среды, а также проявляемое при трогании, при движении в тоннелях и др., где $W = W_o(v) + W_i(s) + W_\phi(v, \Pi)$; v_0 , $v_{\max}(s)$ – соответственно начальная скорость, ограничение скорости в точке пути s ; Π – параметры внешней среды, влияющие на добавочное сопротивление.

В качестве параметров, которые будем варьировать для исследования отклонений их значений от номинальных, выберем: наличие встречного или попутного ветра; отклонение от номинальных тяговых свойств локомотива, что может быть обусловлено колебаниями напряжения в контактной сети, разбросом характеристик тяговых двигателей, неравномерным износом бандажей колесных пар и т.д., а также отклонением от номинальной массы поезда вследствие

различной загрузки пассажирами и грузами. Указанные варьируемые параметры запишем в виде вектора $Y = \{m^*, F^*(R^*), c_b\}^T$, здесь m^* и $F^*(R^*)$ – соответственно отклонения массы, сил тяги и электрического торможения от номинальных значений; c_b – скорость ветра (положительное значение – встречный ветер, отрицательное – попутный). Значение добавочного сопротивления находят как $W_\phi = W_o(v) \cdot (K_b(v, c_b) - 1)$, где K_b – коэффициент, который определяют на основе данных таблицы, приведенной в [8].

С учетом введенных обозначений, основное уравнение движения можно записать в виде:

$$\begin{aligned} v \frac{dv}{ds} (m \pm m^*) \cdot (1 + \gamma) = \\ = (F(v) \pm F^*) - W_o(v) \cdot K_b(v, c_b) - \\ - W_i(s) - B_p(v, P_{bc}) - (R(v) \pm R^*), \end{aligned}$$

причем управляемые параметры (силы тяги, пневматического и электродинамического торможения) обозначим в виде вектора $U = \{F(v), B_p(v, P_{bc}), R(v)\}^T$, компоненты которого в свою очередь зависят от параметров оптимальной траектории $E = \{v_{cm}, s_{\phi\phi}, a_m\}$, где v_{cm} – скорость стабилизации; $s_{\phi\phi}$ – координаты выбега; a_m – программное замедление при торможении, а определяемые в результате вычислительных экспериментов характеристики обозначим в виде вектора $Z = \{A, t\}^T$. При заданных X и Y вектор Z определяется следующей зависимостью: $Z = f(X, Y, U, (E))$.

Условия оптимальности могут быть сформулированы путем перехода многокритериальной задачи к однокритериальной вводя ограничение на время хода: $A \rightarrow \min, t \leq t_3$, здесь t_3 – заданное время хода по перегону. Для определения параметров $v_{cm}, s_{\phi\phi}, a_m$, позволяющих достигнуть оптимума A при заданных X и Y разработана поисковая процедура на базе вычислительного эксперимента с математической моделью. Обозначим $E = E_i$ – множество возможных программ движения поезда, удовлетворяющих условию по времени хода $t \leq t_3$, а также скоростным ограничениям движению по перегону $v_{\max}(s) \leq v$, где E_i – конкретная реализация программы движения с характеристиками $Z, i = \{1 \dots n\}$, здесь n – число сравниваемых программ движения, $j \in \{1 \dots n\}$ – номер программы, $E_N \in E_i, Z(N) \Rightarrow A \rightarrow \min, t \leq t_3$. Так, для рассматриваемого участка при работе поисковой процедуры n может превышать значение 10^6 вариантов.

В качестве примера для проведения исследований был выбран участок пути длиной 15 км с ограничениями скорости 120 км/ч на участке и 40 км/ч в конце участка (въезд на станцию). Тяговые характеристики $F(v)$ примем соответствующими данным для электроваза ЭП10, особенности определения расхода энергии рассмотрены в [5]; масса локомотива – 120 тонн, а номинальную массу вагонов примем 60 тонн, число ва-

гонов в составе – 21, заданное время хода $t_3 = 10$ мин. Значения, входящие в вектор Y , будем варьировать.

Для проведения вычислительного эксперимента была предложена следующая методика. Сначала с помощью поисковой процедуры была определена оптимальная программа движения $Z(Y_0)$ при номинальных параметрах $Y_0 = \{0, 0, 0\}$. Затем, на втором шаге, моделировались реализации найденных на первом шаге параметров (скорость стабилизации, координата перехода на выбег, программное замедление с учетом отклонения значений выбранных параметров от номинальных (наличие ветра $c_в$, ухудшение тяговых свойств локомотива $F^*(R^*)$, отклонения от номинальной массы поезда ввиду изменения загрузки вагонов m^*) $Z^*(Y^*)$. Далее, на третьем этапе, с помощью поисковой процедуры вычислялась оптимальная программа с учетом отклонения выбранных параметров $Z(Y^*)$. Если на втором шаге время хода увеличивается: $t_{Z(Y^*)} > T_3$, то для объективного сравнения влияния на перерасход энергии с помощью поисковой процедуры определяется также оптимальная траектория для увеличенного времени хода $Z(Y^{**})$, $Y^{**}: t_{Y^{**}} = t_{Z(Y^*)}$. Перерасход (экономия) электроэнергии будем определять как:

$$\Delta A = \begin{cases} \frac{A_{Z^*(Y^*)} - A_{Z(Y^*)}}{A_{Z^*(Y^*)}} \cdot 100\%, \text{ если } t_{Z(Y^*)} \approx T_3; \\ \frac{A_{Z^*(Y^*)} - A_{Z(Y^{**})}}{A_{Z^*(Y^*)}} \cdot 100\%, \text{ если } t_{Z(Y^*)} \neq T_3. \end{cases}$$

Результаты вычислительного эксперимента, позволяющие оценить влияние некоторых сочетаний отклонений значений рассматриваемых факторов от номинальных ($Y \neq Y^0$), приведены в табл. 1.

Таблица 1.

Результаты расчётов оптимальных траекторий и реализации расчётной траектории с учетом неконтролируемых отклонений, $t_{Z(Y^0)} = 600$.

№	$c_в, \text{ м/с}$	$F^*(R^*), \text{ кН}$	$m^*, \text{ т}$	$A_{Z(Y^*)}, \text{ кВт}\cdot\text{ч}$	$t_{Z(Y^*)}, \text{ с}$	$A_{Z(Y^0)}, \text{ кВт}\cdot\text{ч}$
1	6	0	0	345.8	602.5	343.7
2	8	0	0	351.2	603.6	351.2
3	10	0	0	366.3	605.5	362.0
4	12	0	0	378.0	607.6	372.2
5	-6	0	0	315.2	597.6	318.4
6	-8	0	0	307.1	596.2	312.9
7	-10	0	0	395.2	504.4	304.6
8	-12	0	0	283.1	592.5	297.3
9	0	-0.05	0	352.8	604.0	354.2
10	0	-0.10	0	378.1	608.3	380.8
11	0	-0.15	0	409.7	614.3	409.4
12	0	0	-2	324.9	598.9	326.6

13	0	0	2	327.1	601.6	339.0
14	0	0	5	345.9	603.6	352.4
15	12	-0.15	5	508.2	627.9	470.7
16	-12	-0.15	5	377.7	612.9	400.0

Анализ данных показывает, что варьируемые неконтролируемые факторы оказывают существенное влияние как на расход энергии, так и на время хода. Возможность оптимизации управления с учетом указанных параметров позволяет оценить табл. 2. В ней сведены данные, полученные при моделировании траекторий $Z^*(Y^*)$ и $Z(Y^{**})$ для некоторых сочетаний параметров Y . Они иллюстрируют эффект от пересчета оптимальных траекторий при корректировке значений расчётных параметров с учетом их отклонений от номинальных. Результаты показывают возможность оптимизации траекторий движения на выбранном участке в некоторых случаях до 5–10 %. Причем, такие возможности тем выше, чем больше отклонения значений параметров от номинальных.

Таблица 2.

Данные для оценки возможности оптимизации программ движения с учетом варьируемых параметров

№	$c_в, \text{ м/с}$	$F^*(R^*), \text{ кН}$	$m^*, \text{ т}$	$t_{Z(Y^*)}, \text{ с}$	$A_{Z^*(Y^*)}, \text{ кВт}\cdot\text{ч}$	$t_{Z(Y^{**})}, \text{ с}$	$A_{Z(Y^{**})}, \text{ кВт}\cdot\text{ч}$	$\Delta A, \%$
1	0	-0.10	0	608.3	380.8	608.2	362.7	4.75
2	12	-0.15	5	627.9	470.7	627.9	450.8	4.22
3	-12	-0.15	5	612.9	400.0	612.9	356.1	10.98

Рисунок 1 иллюстрирует оптимальную и неоптимальные кривые скорости, характеризующие различные траектории движения для данных, приведенных в строке 16 табл. 1 и строке 3 табл. 2. Реализация траектории 1, рассчитанной при номинальных параметрах с учетом отклонений, дает кривую 2. В этом случае часть энергии теряется при пневматическом торможении, которое включается в связи с тем, что на выбеге при попутном ветре снижение скорости осуществляется медленнее, чем при номинальных параметрах. Использовать этот фактор для экономии электроэнергии позволяет траектория 3, рассчитанная с учетом этого фактора.

Таким образом, реализация системы автоматизированного ведения поездов, адаптивной к отклонениям фактических параметров внешней среды от расчётной, позволит обеспечить оптимизацию режимов движения по критерию энергоэффективности. Такая система должна включать блок расчета режимов движения при номинальных параметрах, блок хранения рассчитыва-

емых оптимальных программ движения, а также блоки идентификации параметров движения и корректировки режимов движения в режиме реального времени. Данный подход используется при разработке аппаратно-программных комплексов для бортовой системы управления перспективных локомотивов.

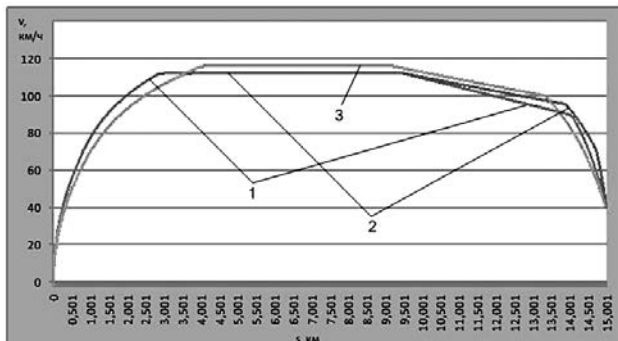


Рис.1. График скорости оптимальных и неоптимальных траекторий движения в координатах «скорость-путь»:

1 – оптимальная траектория, рассчитанная по номинальным параметрам; 2 – реализация траектории 1 с учетом влияния неконтролируемых отклонений; 3 – оптимальная траектория, рассчитанная с учетом влияния неконтролируемых отклонений

Литература

1. Розенфельд В.Е., Исаев И.П., Сидоров Н.Н. Электрическая тяга. – М.: Трансжелдориздат, 1962. – 376 с.
2. Никифоров Н.Б., Головин В.И., Кутыев Ю.Г. Автоматизация управления торможением поездов. – М.: Транспорт, 1985. – 263 с.

3. Микропроцессорные системы автоведения подвижного состава / Л.А. Баранов, Л.М. Головичер, Е.В. Ерофеев, В.И. Максимов; под ред. Л.А. Баранова. – М.: Транспорт, 1990. – 272 с.
4. Мугинштейн Л.А., Илютович А.Е., Ябло И.А. Энергооптимальные методы управления движением поездов: сб. научн. трудов ОАО «ВНИИЖТ». М.: Интекст, 2012. – 80 с.
5. Юренко К.И. Расчёт энергооптимальных режимов движения перспективного подвижного состава методом динамического программирования / Известия вузов. Электромеханика. №3. 2013. – С. 78-82.
6. Климович А.В. Оптимизация управления движением поезда по минимуму затрат энергоресурсов на тягу. М.: Компания Спутник+, 2008. – 263 с.
7. Савоськин, А.Н. Программно-аппаратный комплекс для имитационного моделирования в реальном времени двухпутного участка железной дороги с двумя локомотивами переменного тока / А.Н. Савоськин, Д.И. Болдин, М.В. Телегин 2013.-№ 5. - С. 113-119.
8. Осипов С.И., Осипов С.С., Феоктистов В.П. Теория электрической тяги. – М.: Маршрут, 2006. – 436 с.
9. Юренко, К.И. Программный комплекс для математического моделирования движения поезда / К.И.
10. Юренко, Е.И. Фандеев, Ю.А. Жлоба // Материалы за 10-а международна научна практична конференция, «Найновите научни постижения», - 2014. Том 32. Технологии. София.- «БялГРАД-БГ» ООД – С. 80-85.

Юренко К.И., Шепилова Е.Г., Гречук И.А. РГУПС, г. Ростов-на-Дону

Имитационное моделирование режимов движения поезда на базе тренажеро-моделирующих комплексов

Совершенствование бортовых систем управления и автоведения локомотивов способствует, с одной стороны, повышению безопасности движения, поскольку уменьшается влияние человеческого фактора в сложном технологическом процессе ведения поезда. С другой стороны, успешная реализация функций автоматического управления позволяет улучшить условия труда локомотивной бригады; энергоэффективность использования тягового подвижного состава путем снижения расхода электроэнергии и топливных ресурсов; оптимизировать график движения посредством адаптации к динамически изменяющимся условиям среды функционирования.

Требования к системам управления подвижного состава предполагают модульное его построение, когда основные подсистемы (тяги, торможения, безопасности, автоведения и др.) реализуются в виде законченных систем со встроенными электронными устройствами управления и диагностики и взаимодействуют между собой с помощью коммуникационных каналов связи и соответствующих интерфейсов. В результате, современные локомотивы представляет собой сложную человеко-машинную систему с распределённой многоуровневой иерархической системой управления.

Для решения актуальной задачи обучения навыкам эксплуатации таких систем традиционно используют

ся программно-аппаратные тренажеро-моделирующие комплексы (ТМК). К их числу могут быть отнесены и тренажеры машиниста локомотива, основное назначение которых – имитация поведения объекта, в данном случае, грузового или пассажирского поезда, и отработка навыков управления им. В Ростовском государственном университете путей сообщения такие тренажеры функционируют в составе лабораторно-тренажерного комплекса «Виртуальная железная дорога» [1].

Вместе с тем, помимо традиционных функций тренажеров, связанных с обучением локомотивных бригад, в условиях постоянной разработки и внедрения на локомотивы сложных аппаратно-программных комплексов актуальной и сравнительно новой задачей является их использование для испытаний перспективных программно-технических средств автоматизации управления. Другим важным применением становится использование ТМК для проведения научно-исследовательских работ, в частности, для:

- оптимизации алгоритмов и программ систем автоматизированного ведения поездов;
- отработки реакции сложных человеко-машинных систем на динамически изменяющиеся условия внешней среды;
- испытания аппаратно-программных комплексов управления автоматическими тормозами поезда в тяжелых условиях эксплуатации, например, в условиях переломного профиля пути, затяжных подъемов и спусках;
- моделирования реальных аварийных ситуаций для использования движения грузового поезда, в частности, длинносоставных и тяжеловесных поездов, отработка режимов движения с учетом наличия продольно-динамических реакций в составе, исследование различных скоростных режимов движения по участку;
- совершенствования алгоритмов управления движением поездов, в частности, с точки зрения оптимального расхода электроэнергии при движении по перегону с учетом сложного профиля пути, и, как составляющая этой проблемы, – минимизации потерь кинетической энергии в тормозах при обеспечении безопасности и отсутствия недопустимых продольно-динамических сил в поезде.

Таким образом, ТМК можно рассматривать не только как средство обучения, но и как лабораторную базу для проведения научных исследований при решении, например, задач оптимизации управления движением поездам в различных условиях, а также инженерных задач по разработке и совершенствованию технических средств автоматизации, что особенно актуально применительно к железнодорожному транспорту, по-

скольку испытания подобных систем на участке дороги или на специализированном полигоне связаны с существенными организационными трудностями и расходами. В то же время возможности современных ТМК по имитационному моделированию движения поездов могут быть существенно расширены при создании и использовании дополнительных технических средств [2].

Моделирование режимов движения поезда необходимо при разработке и испытаниях бортовых систем управления и автоведения, особенно применительно к функциям, связанным с безопасностью движения, а также поиском и реализацией энергооптимальных режимов ведения поезда. В теории электрической тяги рассматриваются следующие режимы движения: тяга, выбег (движение по инерции) и торможение. В теории оптимального управления выделяют: режим тяги, когда движение осуществляется с максимальной силой тяги, называемый иногда разгоном; режим стабилизации, когда осуществляется движение с постоянной скоростью в тяге; выбег; торможение, при котором осуществляется замедление поезда с максимальной интенсивностью, часто называемый замедлением; режим стабилизации скорости электрическим и пневматическим тормозом; рекуперация с максимальной интенсивностью, а также режим стабилизации скорости с помощью рекуперативного торможения [3]. К числу параметров, определяющих переключение указанных режимов движения, относятся скорость стабилизации, координата перехода на выбег и скорость начала торможения, которые могут быть определены с помощью различных методов оптимизации [4,5].

Известно, что торможение поезда – один из важнейших режимов, возникающих в процессе его движения, который связан как с безопасностью, так и с оптимизацией расхода энергии [6]. Обеспечение безопасности движения, в свою очередь, связано с соблюдением скоростного режима (выполнение ограничений скорости, подтормаживание на «вредном» спуске и т.д.), реакцией на сигналы светофоров – ограничивающих и запрещающих (снижение скорости на желтый и белый, остановочное торможение на красный свет), а также недопущением превышения допустимых ускорений и продольно-динамических усилий в поезде.

Для моделирования указанных режимов разработан программный модуль для имитации автоматизированного управления движением поезда с помощью ТМК. Это позволяет отрабатывать различные функции бортовой системы. В качестве примера на рис. 1 представлено моделирование функции стабилизация скорости на затяжном спуске 9 ‰ с помощью пневматического тормоза, а на рис. 2 – функция торможения примерно до 20 км/ч с целью последующей остановки

на запрещающий сигнал светофора. На рисунках показаны кривые скорости движения V и давления в тормозных цилиндрах P .

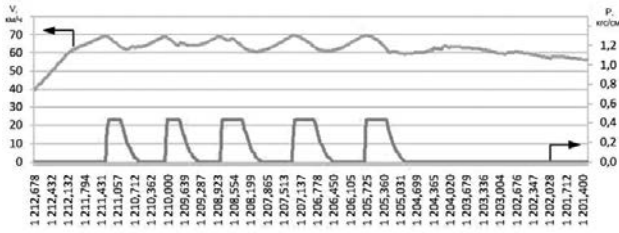


Рис.1. График стабилизации скорости на спуске 9‰ с помощью пневматического тормоза

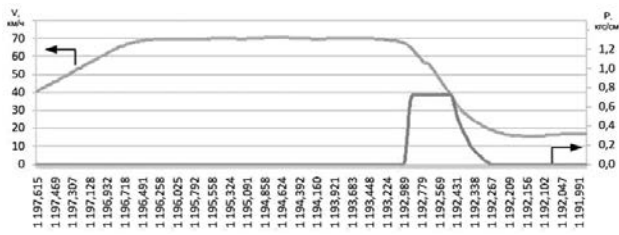


Рис.2. График снижения скорости при торможении

При выполнении вычислительного эксперимента использовались данные одного из перегонов участка СКЖД Ростов-Лихая. Приведенные примеры получены для грузового поезда с 60-ю вагонами и локомотивом ВЛ80С. При моделировании на базе ТМК процесс движения поезда отображается в режиме реального времени с помощью окна человеко-машинного интерфейса – рис. 3.

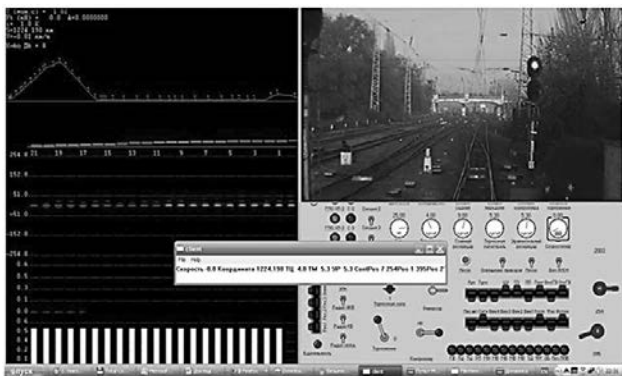


Рис.3. Человеко-машинный интерфейс ТМК

Рассмотренные возможности использования ТМК для имитационного моделирования режимов движе-

ния поезда позволяют исследовать различные функции бортовых систем управления, связанные с автоматизированным ведением поезда, в частности, с использованием пневматического тормоза для снижения скорости перед запрещающим сигналом светофора или ограничением скорости, а также при движении на участках с переломным профилем и «вредных» спусках. Это существенно упрощает совершенствование существующих и создание новых программно-технических средств для автоматизации подвижного состава железных дорог.

Литература

1. Верескун, В.Д. Учебно-исследовательский лабораторный комплекс «Виртуальная железная дорога / В.Д. Верескун, В.И. Колесников, Н.Н. Сухорукова // Тр. 3-й междунар. науч.-техн. конф. «Компьютерное моделирование–2002». — СПб.: СПбГПУ, 2002. — С. 203–209.
2. Юренко, К.И. Совершенствование бортовых систем управления локомотивов на базе технических средств тренажеро-моделирующих комплексов / К.И. Юренко, Е.Г. Шепилова, И.А. Гречук Электронный научный журнал «Инженерный Вестник Дона». [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник Дона», 2014, №3 – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n2y2014/2452> (доступ свободный) - Заглав. с экрана. – Яз. рус.
3. Пудовиков, О.Е. Автоматическое управление скоростью грузового поезда с электровозом, допускающим плавное управление силами тяги и торможения : дис. ... д-ра тех. наук : 05.13.06., 05.22.07 – М: Олег Евгеньевич Пудовиков, МГУПС(МИИТ), 2011. – 291 с.
4. Баранов, Л.А. Микропроцессорные системы автоведения электроподвижного состава / Л.А. Баранов [и др]. – М.: Транспорт, 1990. – 272 с.
5. Юренко, К.И. Расчёт энергооптимальных режимов движения перспективного подвижного состава методом динамического программирования / К.И. Юренко // Изв. вузов. Электромеханика. 2013. – №3. – С.78-82.
6. Вождение поездов: Пособие машинисту / Р.Г. Черепашенцев, В.А. Бирюков, В.Т. Понкрашов, А.Н. Судилковский; под. ред. Р.Г. Черепашенца. – М.: Транспорт, 1994. – 304 с.

Сергеев Б.С., ФГБОУ ВПО УрГУПС, г. Екатеринбург
Харитонов И.В., ФГУП НПО «Автоматики», г. Екатеринбург

Интеллектуальные возможности применения светодиодных систем на локомотивах железнодорожного транспорта

Преимущества светодиодных систем при использовании их в качестве излучателей общеизвестны, основными из которых являются высокая энергетическая эффективность и существенно больший срок службы [1]. Отличие подобных систем от систем на основе ламп накаливания позволяет реализовать новые функциональные возможности локомотивов железнодорожного транспорта.

Стандартный прожектор для локомотива светит вперед узким пучком. С одной стороны, такое решение хорошо освещает путь на длинных прямых участках и позволяет на дальних расстояниях не ослеплять встречную локомотивную бригаду. С другой стороны, такой подход не эффективен при освещении пути непосредственно перед локомотивом (при маневровых работах) и на кривых участках пути, что негативно сказывается на безопасности движения. Очевидное решение расширить диаграмму направленности прожектора не является эффективным: существенно увеличиваются потери на головной источник света и появляется проблема ослепления встречной бригады. Известны решения на основе поворотных механизмов, которые разворачивают прожектор в ту сторону, в которую поворачивает локомотив [2]. Данное решение также не эффективно, так как уменьшает надежность лобового прожектора из-за того, что приходится использовать электромеханические компоненты в конструкции, кроме того, при таком решении прожектор также подсвечивает лишь ограниченную часть впереди лежащего пути, кроме того, сохраняется проблема ослепления встречной локомотивной бригады.

Применение светодиодов в оптических системах позволит существенно снизить затраты на питание лобового прожектора, что дает возможность расширить световой пучок устройства. Кроме того, конструкции прожекторов на основе светодиодов обычно делают модульными [3], что позволяет управлять отдельными частями прибора. При этом каждый модуль дает свой вклад в общую КСС прожектора. Управление модулями для оптимизации светового потока прожектора под конкретный впереди лежащий путь можно осуществлять по различным алгоритмам. Таким образом, применение прожектора со сложной широкой изменяемой диаграммой направленности повысит безопасность движения на железной дороге.

В настоящее время на железной дороге используются различные способы и стандарты для передачи информации, которые в основном основаны на радиоканале или проводной связи. Данные виды связи имеют множество недостатков: они подвержены наводкам, взаимному влиянию, их можно легко перехватить и использовать в иных целях, их использование сопровождается разработкой специальных фильтров или алгоритмов кодирования, что сказывается на надежности, скорости передачи информационного канала. В конце прошлого века стал развиваться новый вид связи – открытый оптический канал, который нашел широкое применение, например, в пультах дистанционного управления. Данный вид связи легко организовать на основе лазерных или обычных светодиодов. Применение данного вида связи имеет ряд преимуществ: качество связи не зависит от окружающей радио обстановки, сложность незаметной установки прослушивающих устройств, значительно более высокая скорость передачи информации. Непосредственное применение данного способа связи на железной дороге для обмена информацией между локомотивом и наземными службами было затруднено ввиду малого применения светодиодов на подвижном составе в качестве прожектора, а также из-за узкого луча прожектора локомотива, т.к. данный вид связи требует точной наводки источника на приемник (см. рис.1). При использовании на локомотиве прожектора с широкой переменной диаграммой направленности, становится принципиально возможно наводить информационный пучок на любое месторасположение приемника около путей. Сигнал принципиально возможно подмешивать к уровню постоянного света от прожектора, при помощи добавления небольшого процента высокочастотной пульсации. Машинист данную пульсацию ощущать не будет, т.к. максимальная частота, на которую реагирует человеческий организм не превышает килогерца. Таким образом на железной дороге становится возможно организовать новый канал связи, что положительно скажется на достоверности передаваемой информации и на безопасности движения.

Появление низкокапотных маневровых локомотивов, например, ТЭМ ТМХ, ТЭМ9Н позволяет машинисту вести обзор практически на все 360 градусов вокруг себя во время маневровой работы. Данная

возможность хорошо сказывается на безопасности, т.к. машинист видит всю окружающую обстановку и способен оперативно на нее реагировать. Однако подобное нововведение существенно усложнило конструкцию рамы кабины управления, т.к. появились трудности с организацией общего освещения. Согласно нормам безопасности, необходимо выполнить требование отсутствия отражений от светильников в лобовых стеклах кабины [4]. Наличие отражений существенно ухудшает обзор машинисту во время ночных и сумеречных работ, что негативно отражается на их безопасности (см. рис.2). Стандартным решением технической задачи является введение угла наклона лобовых стекол, что усложняет конструкцию рамы кабины управления и увеличивает стоимость ее производства. Светодиод обладает миниатюрным световым телом и малым корпусом. Существуют различные способы управления световым потоком светодиода, направляя его в конкретные направления, при этом физически данные способы реализуются в виде малогабаритных устройств. Данные производственные возможности позволяют добиться требуемой по нормам общей освещенности, не создавая опасные отражения на лобовых стеклах и упрощая конструкцию кабины управления [5].

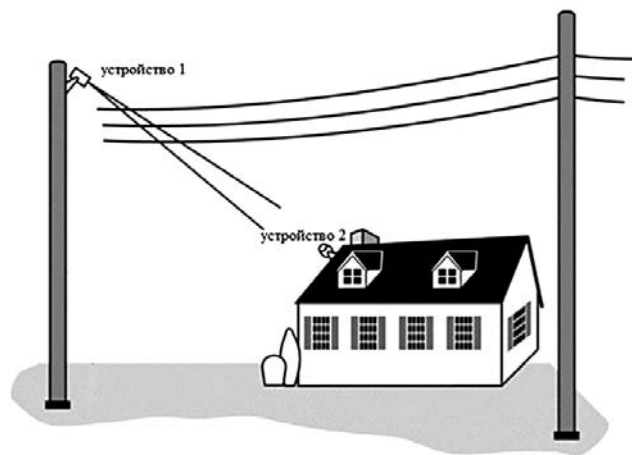


Рис.1. Взаимное расположение приемника и передатчика при работе в открытом оптическом канале связи

Известно, что человеческий глаз способен воспринимать излучение различными способами: зрительно через колбочки и палочки, незрительно или биологически через меланопсин содержащие клетки сетчатки, сигналы от которых поступают в эпифиз – орган, регулирующий выработку мелатонина (см. рис.4) [6]. Чередование циклов света и темноты вызывают циклическую секрецию мелатонина и кортизола (см. рис.5) [7]. Известны исследования, показывающие, что нарушения естественных колебаний содержания мелатонина в крови существенно влияют на биологическое состояние человека [8]. Спектр биологического

действия (спектр подавления мелатонина) имеет максимум в районе 460нм, что рядом с максимумом синего излучения для большинства современных светодиодов [9]. Современные исследования показывают, что подавление мелатонина увеличивается по мере роста коррелированной цветовой температуры излучателя, и светодиоды теплого спектра оказывают влияние на подавление мелатонина не больше, чем лампы накаливания [7, 9].



Рис.2. Отражения от общего освещения в лобовом стекле кабины управления.

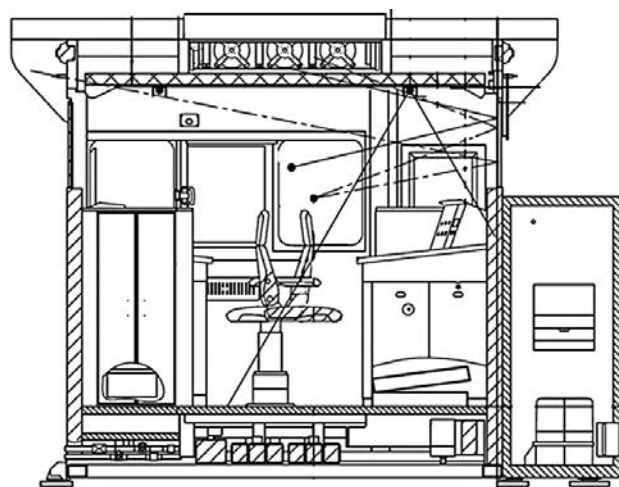


Рис.3 Конструкция кабины управления маневрового тепловоза при оптимальном использовании светового потока светодиода.

С другой стороны, доказано, что увеличение доли синего света в освещении повышает бдительность за счет подавления мелатонина [10]. Использование стандартных светильников на основе ламп накаливания или светодиодов обычно имеет определенную неменяющуюся цветовую температуру. Возможно применение в системе общего освещения RGB-диодов, или светодиодов с различной коррелированной цветовой температурой. Возможно ввести систему управления долей тока через различные группы кристаллов для

изменения коррелированной цветовой температуры всего светильника. Таким образом, становится принципиально возможно создать светильник на основе светодиодов с функцией обеспечения переменной коррелированной цветовой температуры, при этом возможен различный алгоритм поведения светильника. Возможно увеличение доли синего света в спектре только в вечерние и утренние часы, когда выделение мелатонина минимально, и побочных эффектов искусственное повышение бдительности не принесет, или возможно помимо этого кратковременное повышение доли синего в ночные часы на сложных участках пути, когда от локомотивной бригады требуется максимальная бдительность. Таким образом, применение светильников с переменной коррелированной цветовой температурой позволит повысить безопасность движения на железных дорогах.

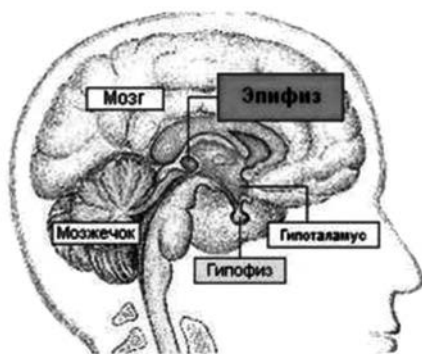


Рис.4 Положение эпифиза в организме человека.

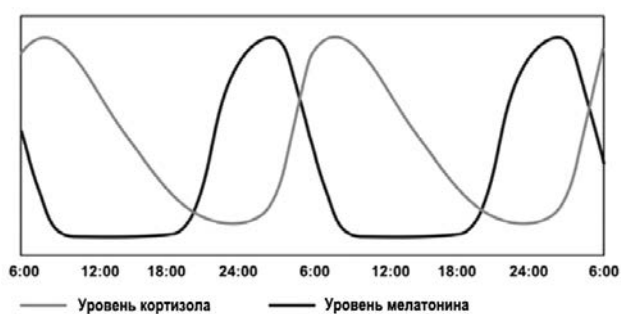


Рис.5 Циклы выработки мелатонина и кортизола в организме человека.

В настоящее время эти работы выполняются в Уральском государственном университете путей сообщения совместно с Научно-производственным объединением Автоматики Федерального Космического Агентства им. ак. Семихатова Н.А. Дальнейшее про-

должение предлагаемых разработок ведется в планах НИОКР НПО Автоматики и Уральского государственного университета путей сообщения.

Литература

1. Ададуров С.Е., Розенберг Е.Н., Мурашова М.А. Концепция ком-плексной программы «Внедрение светодиодной техники в ОАО «РЖД» // Автоматика, связь, информатика. – 2009. – № 2. – с. 2-5. ISSN 0005-2329.
2. Пат. 2139470 Российская Федерация, МПК F21M3/08. Поворотное полипрожекторное устройство рельсового подвижного состава. Вейцель О.О., Гулин С.А. Петербургский государственный институт путей сообщения. - № 97119350/09; заявл. 26.11.1997; опубл. 10.10.1999.
3. Харитонов И.В., Сергеев Б.С. Особенности проектирования узко-градусной линзы для светодиодного прожектора локомотива // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2014 - №5 – с. 11-13. ISSN 1812-6782
4. Тепловозы, Нормы безопасности. НБ ЖТ ЦТ 02-98. Ред. 2 – М.: ОАО «РЖД». – 1998. – 56 с.
5. Харитонов И.В., Сергеев Б.С. Анализ освещенности кабины машиниста маневрового тепловоза// Транспорт Урала. – 2014 - №2 – с. 73-76. ISSN 1818-9400.
6. Пат. США № 7678140, МПК A61N 5/0618. Photoreceptor system for melatonin regulation and phototherapy. Brainard, G., Glickman, G. опубл. 27.12.2001.
7. Бижак Г., Кобав М.Б. Спектры излучения светодиодов и спектр действия для подавления секреции мелатонина // Светотехника. – 2012. -№3. – с. 11-16. ISSN 0039-7067.
8. Анисимов В.Н. Мелатонин: роль в организме, применение в клинике// РМЖ. - 2006 - т.14. - №4. – р. 269
9. Аладов А.В., Закгейм А.Л., Мизеров М.Н., Черняков А.Е. О биологическом эквиваленте излучения светодиодных и традиционных источников света с цветовой температурой 1800-10000 К // Светотехника. – 2012. -№3. – с. 7-10. ISSN 0039-7067.
10. Taillard J, Capelli A, Sagaspe P, Anund A, Akerstedt T, et al. (2012) In-Car Nocturnal Blue Light Exposure Improves Motorway Driving: A Randomized Controlled Trial // Электронный журнал «PLOS ONE», Опубл. 19.10.2012. eISSN-1932-6203 URL: <http://www.plosone.org/article/info%3Adoi%2F10.1371%2Fjournal.pone.0046750>.

Волынская А.В., ФГБОУ ВПО УрГУПС, г. Екатеринбург
Сапожников И.В., ФГБОУ ВПО СибГУТИ, г. Новосибирск

Теория, компьютерное моделирование и схемные решения адаптивного канала телеуправления с применением шумоподобных сигналов

В каналах телеуправления решается или задача различения сигналов, или задача обнаружения сигнала, которую можно рассматривать как частный случай задачи различения. Для решения этих задач оптимальным образом следует применять корреляционный прием. Корреляционный прием тем эффективней, чем сложнее полезный сигнал [1, 2]. Но для решения задачи обнаружения не все сложные сигналы одинаково эффективны. Наилучшими являются те, у которых отношение N главного пика функции автокорреляции (АКФ) к боковым – наибольшее. Такие сигналы найдены Баркером [3]. Бинарная кодовая последовательность Баркера состоит из символов ± 1 и характеризуется нормированной импульсной АКФ вида

$$r_\tau = \begin{cases} 1 & \text{для } \tau = 0, \\ 0 & \text{для } \tau = 2l + 1, \\ \pm 1/N & \text{для } \tau = 2l, \end{cases}$$

где $l=0,1,\dots,(n-1)/2$, знак в последней строке зависит от длины последовательности N .

Сторер (Storer) и Турин (Turin) в 1958 г. доказали теорему: «Не существует последовательностей Баркера нечетной длины, превосходящей 13. Бинарные коды Баркера существуют только для длин $N = 2, 3, 4, 5, 7, 11, 13$ [4]. В 1961 г. они же сделали предположение: «Не существует кодов Баркера четных длин при $N > 13$ ». В начале 60-х годов 20 века Turin доказал теорему: «Если существует бинарный код Баркера четной длины $N > 4$, тогда длина кода должна быть записана в виде $N=4k^2$, где k – некоторое целое, не являющееся степенью простого числа» [5]. Теорема была доказана для случая $k \leq 55$. В 1990 г. Eliahou, Kervaire and Saffari нашли новое условие для возможных значений четных кодов Баркера: «Если существует код Баркера четной длины N , тогда N не должно содержать простых делителей конгруэнтных 3 по модулю 4» [6]. В 1992 г. диапазон длин не существования кодов Баркера был расширен до значения длины $N = 1898884$ [7]. Новый шаг в исследованиях был сделан в 1999 г., благодаря работе Schmidt [8]. В итоге было показано, что не существует бинарных кодов Баркера четных длин в диапазоне $13 < N \leq 4 \cdot 10^{12}$. Доработки метода спуска в поле в работах 2002 г. – Schmidt [9], 2005г. – Leung, Schmidt [10] дали дальнейшее увеличение диапазона не существования кодов Баркера четных длин $13 < N \leq 10^{22}$.

На сегодняшний день рекордная ширина диапазона несуществования бинарных кодов Баркера нечетных длин получена Mossinghoff (теорема Mossinghoff) в 2009 г., верхняя граница диапазона составляет 2^{1030} : «Не существует кодов Баркера четных длин в диапазоне $13 < N \leq 2 \cdot 10^{30}$ (с возможным исключением длины $N = 189260468001034441522766781604$)» [11].

Итак, всего сигналов Баркера – 8, самый сложный из них состоит из 13 символов и имеет отношение высоты главного пика АКФ к боковым $N = 13$ (рис. 1).

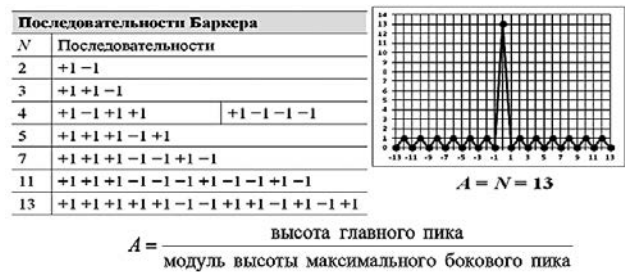


Рис. 1. Канонические последовательности Баркера и АКФ 13-элементной последовательности Баркера

Практическая ценность последовательностей Баркера: $A = N$; других бинарных последовательностей с таким свойством не существует.

Однако в наиболее «тяжелых» в смысле помехоустойчивости каналах, например, каналах телеуправления электрифицированного железнодорожного транспорта, даже сигналы Баркера не обеспечивают требуемой надежности их обнаружения. На рис. 2 приведены функции взаимной корреляции сигналов Баркера 7 (а) и 11 (б) с ошибками в трех разрядах. Видим, что 7-элементный сигнал уже не обнаруживается, так как главный пик стал ниже бокового; кроме того, такая ситуация приводит к «ложной тревоге». Видим также, что если сигнал более сложный – 11-разрядный, то при той же помехе он может быть обнаружен, так как главный пик выше боковых.

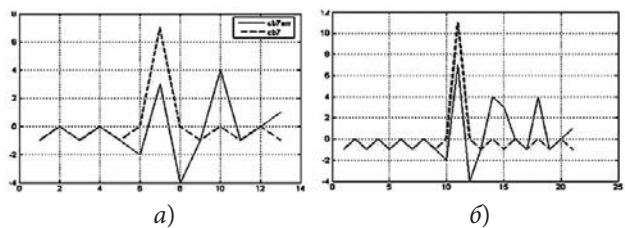


Рис. 2. Влияние помех на корреляционную функцию канонических сигналов Баркера

Если поставить условие, чтобы значения $1/N$ не превышали только положительные пики АКФ, то, вероятно, существуют сигналы более длинные, нежели сигналы Баркера. В результате проведенных нами исследований разработан «быстрый» алгоритм поиска псевдослучайных кодовых последовательностей с квазиидеальной автокорреляционной функцией. Это позволило за разумное машинное время найти последовательности длиной N , равной: 14, 21, 22, 33, 49, 77, 121; а также превышением главного пика АКФ над положительными боковыми, равным N [12]. Известные ранее последовательности длиной более тринадцати (например, m -последовательности), имеют превышение не более \sqrt{N} . Один из способов поиска основан на комбинировании сигналов Баркера [13]. В качестве «материнской» последовательности берется последовательность Баркера, а затем каждый элемент материнской последовательности заменяется прямой или инверсной «дочерней» последовательностью Баркера же, в зависимости от того, ноль или единица в материнской последовательности.

Из 38 возможных парных комбинаций материнских и дочерних последовательностей нашему требованию удовлетворяют только 10 последовательностей: $3 \times 4, 1$; 3×3 ; 3×7 ; 3×11 ; 7×3 ; 7×7 ; 7×11 ; 11×3 ; 11×7 ; 11×11 , где первое число – материнская последовательность, второе число – дочерняя последовательность. Например, для последовательности 3×7 материнская последовательность – 110, а дочерняя – 1110010, тогда новая последовательность имеет вид: 1110010 1110010 0001101. АКФ найденных последовательностей приведены на рис. 3.

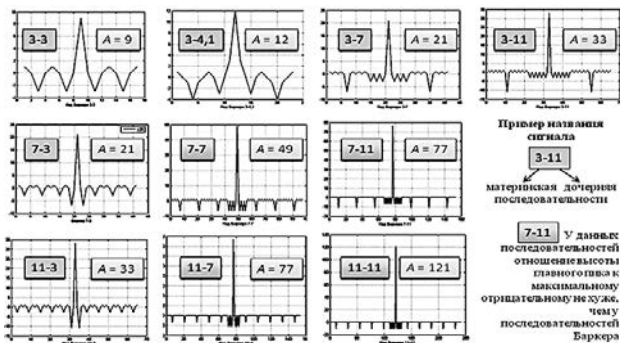


Рис. 3. АКФ комбинированных последовательностей для $A > 13$ ($A = N$)

Так как помехи снижают главный пик корреляционной функции и поднимают боковые пики, то, чем больше отношение высоты главного пика АКФ к боковым, тем выше вероятность правильного приема сигналов. Если сравнить это отношение у сигнала Баркера 13 с комбинированным сигналом Баркера 11×11 , то видим, что оно в $121/13 = 9,308\dots$ раз больше.

Оценка помехоустойчивости новых сигналов проведена путем моделирования в программной среде LabVIEW (рис. 4–6).

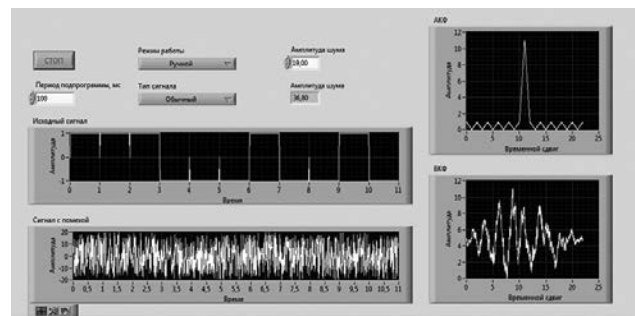


Рис. 4. 11-элементный сигнал Баркера + помеха ($C/P = 1/19$) и функция взаимной корреляции (ФВК)

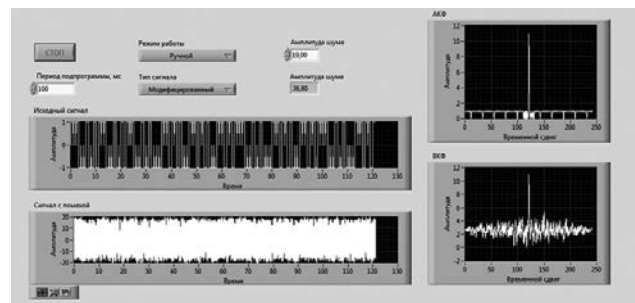


Рис. 5. Комбинированный сигнал Баркера 11×11 + помеха ($C/P = 1/19$) и ФВК

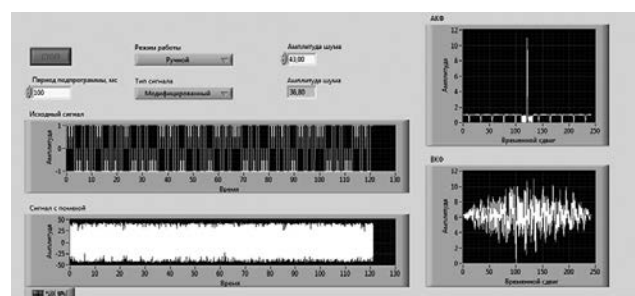


Рис. 6. Комбинированный сигнал Баркера 11×11 + помеха ($C/P = 1/43$) и ФВК

Видим, что при отношении $C/P = 1/19$ сигнал Баркера 11 не обнаруживается, т.к. главный пик ФВК соизмерим с боковыми. Кроме того, это может привести к «ложной тревоге». Комбинированный сигнал Баркера при этом же отношении C/P надежно обнаруживается, т.к. главный пик ФВК существенно превышает боковые. Обнаружение нового сигнала становится затруднительным только при отношении $C/P = 1/43$.

По результатам моделирования построены зависимости вероятности ошибки от отношения сигнал/помеха (рис. 7).

Техническая реализация. На рис. 8 а) приведена блок-схема генератора комбинированных сигналов Баркера, который содержит [14]: Д3, Д7, Д11 – формирователи дочерних (быстрых) канонических последовательностей Баркера; М3, М7, М11 – формирователи материнских (медленных) канонических последовательностей Баркера; F – генератор тактовых импульсов; F/3,

$F/7, F/11$ – делители частоты на 3 на 7 и на 11; \oplus – сумматор по модулю два; П1, П2, П3 – переключатели.

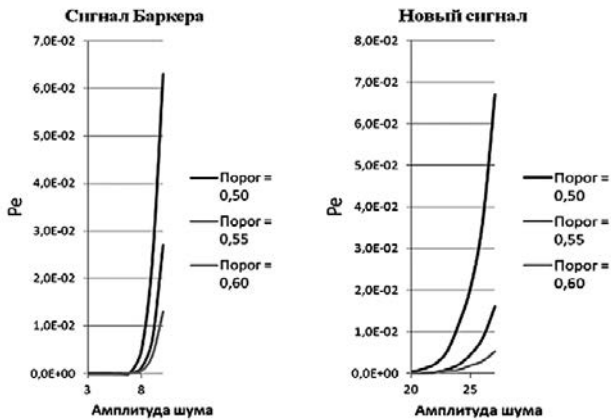


Рис.7. Сравнительные результаты оценки помехоустойчивости (равномерный белый шум)

Схемы дочерних и материнских формирователей канонических последовательностей Баркера – одинаковые, но работают с разной тактовой частотой.

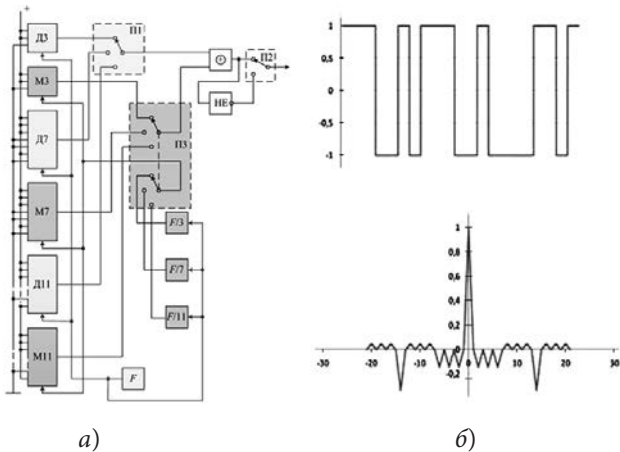


Рис. 8. Блок-схема генератора комбинированных сигналов Баркера (а), комбинированный сигнал Баркера 3×7 и его нормированная АКФ (б)

Генератор работает следующим образом. На верхний вход сумматора по модулю два через переключатель П1 подается сигнал с одного из дочерних формирователей. На нижний вход П1 поступает какая-либо из материнских последовательностей через верхнюю секцию двухсекционного переключателя П3. Логика работы сумматора по модулю два такова, что когда на его нижнем входе логический ноль, то для второго входа он работает как повторитель, а если на нижнем входе – логическая единица, то для второго входа он работает как инвертор. Поэтому на выходе сумматора по модулю два дочерняя быстрая последовательность будет либо неинвертированная, либо инвертированная в соответствии с медленной материнской последовательностью.

На рис. 8 б) приведен комбинированный сигнал Баркера 3×7 на выходе сумматора по модулю два (и его нормированная АКФ). Сигнал, в свою очередь, может быть проинвертирован элементом «НЕ» в нижнем положении переключателя П2.

На рис. 9 приведена блок-схема оптимального фильтра-обнаружителя комбинированных сигналов Баркера [14], который содержит: РС – цифровая линия задержки, выполненная в виде регистра сдвига; СМ 121 – СМ 9 – аналоговые сумматоры с количеством входов 121, 77, 77, 49, 33, 33, 21, 21, 9; П – двухсекционный переключатель на 9 направлений; КП – компаратор, выполняющий совместно с резистивным делителем напряжения $R_0 - R_6$ роль порогового устройства.

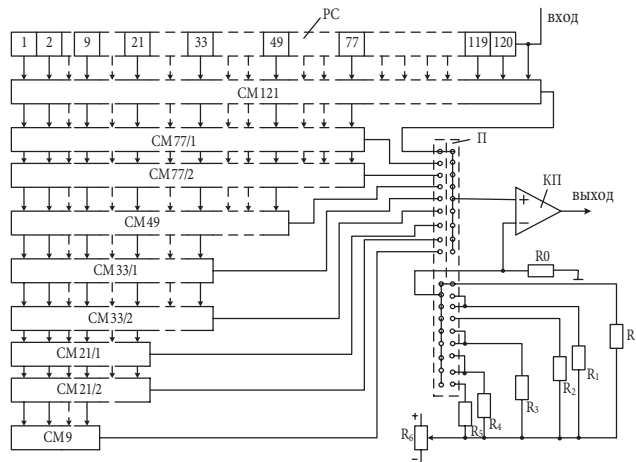


Рис. 9. Оптимальный фильтр-обнаружитель комбинированных сигналов Баркера

Сумматор СМ 21/2, например, выполняет роль оптимального фильтра для комбинированного сигнала Баркера 7×3, а на его выходе формируется функция взаимной (при наличии помех в канале) либо авто- (помех нет) корреляции, что показано на рис. 10. Эта функция имеет главный пик; его высота зависит от отношения сигнал/помеха, который может быть зафиксирован при превышении им порога, задаваемого потенциометром R_6 , появлением на выходе компаратора КП уровня логической единицы.

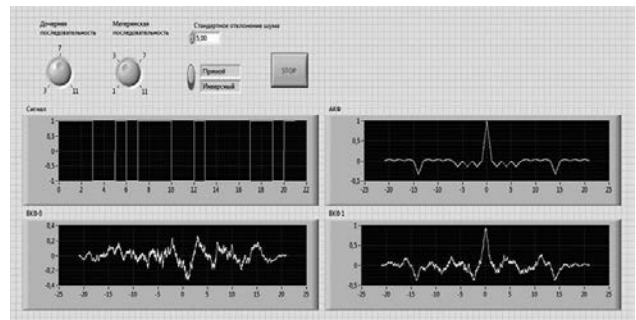


Рис. 10. Комбинированный сигнал Баркера 7-3, его АКФ, помеха и ФВК

На основе данных схемных решений разрабатывается адаптивный канал телеуправления, в котором в зависимости от уровня помех команды передаются либо короткими сигналами Баркера, либо более длинными новыми сигналами. Предполагаемая область применения – PLC-R каналы по металлическим направляющим (контактный провод, волновод поездной радиосвязи и т.д.) электрифицированных железных дорог, где уровень электромагнитных помех беспрецедентно высок [15].

Литература

1. Ли И., Читем Т., Виснер Дж. Применение корреляционного анализа для обнаружения периодических сигналов в шуме // Теория информации и ее приложения / под ред. А.А. Харкевича. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1959. – С. 138–158.
2. Питерсон В., Бердсал Т., Фокс В. Теория обнаружения сигналов // Теория информации и ее приложения / под ред. А.А. Харкевича. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1959. – С. 210–275.
3. Barker R.H. Group synchronizing of binary digital system // Communication theory. – London, 1953. – 273 p.
4. Storer J.E., Turyn R. Optimum finite code groups// roceedings IRE (Correspondence), 1958, V. 46, pp.1649.
5. Turyn R.J., Storer J. On binary sequences// Proc. Amer. Math. Soc., 12, 1961, pp. 394–399.
6. Eliahou S., Kervaire M., Saffari, B. A new restriction on the lengths of Golay complementary sequences// J. Combin. Theory (A), 55, 1990, pp. 49–59.
7. Eliahou S., Kervaire M. Barker sequences and difference sets// L'Enseignement Mathematique, 1992, V.38, pp.345-382.
8. Schmidt B. Cyclotomic integers and finite geometry // J. Am. Math. Soc., Vol. 12, 1999, pp.929-952.
9. Schmidt B. Characters and cyclotomic fields in finite geometry // Lecture Notes in Mathematics, Vol. 1797, Springer, Berlin, 2002.
10. Leung K.H., Schmidt B. The field descent method// Designs, codes and cryptography, Vol. 26, 2005, pp.171-188.
11. Mossinghoff M.J. Wieferich pairs and Barker sequences // Designs, Codes and Cryptography, 53, No. 3, 2009, pp.149-163.
12. Волынская А.В. Результаты математического моделирования процесса поиска кодовых последовательностей с заданными корреляционными свойствами // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения : Науч.-техн. журнал. – Екатеринбург : УрГУПС, 2009. – № 3–4. – С. 64–71.
13. Волынская А.В., Калинин П.М. Новые помехоустойчивые сигналы для интеллектуального канала телемеханики // Фундаментальные исследования: Науч. журнал РАЕ. – М., 2012. – № 11. – Ч. 4. – С. 922–926.
14. Волынская А.В. Разработка устройств формирования и оптимальной обработки сложных двоичных сигналов для информационных систем железнодорожного транспорта // Информационные технологии : Науч.-техн. журнал. – М.: Новые технологии, 2014. – № 2. – С. 65-70.
15. Волынская А.В., Сергеев Б.С. Предпосылки применения псевдослучайных сигналов-переносчиков в каналах телемеханики железнодорожного транспорта // Транспорт: наука, техника, управление: Научный информационный сборник РАН ВИНТИ, 2011. – Вып. 6. – С. 39–41.

Егоров В.Б., ФГБОУ ВПО УрГУПС, г. Екатеринбург

Выбор ИКМ-трактов для передачи пакетов

На существующих сетях связи имеется много свободных ИКМ-трактов со скоростями передачи от 2 мбит/сек (ЦСЛ E1) до 155 мбит/сек (ЦСЛ STM1). В то же время на сетях всё чаще требуется передавать пакеты данных, для непосредственной передачи которых ИКМ-тракты не пригодны.

В этих условиях на сетях связи для сопряжения трактов передачи пакетов с ИКМ трактами стали использовать инверсные маршрутизаторы (ИМ) или шлюзы. При выборе типоразмеров ИМ обычно исходят из примерного равенства скоростей передачи и в тракте передачи пакетов и в ИКМ-трактах, например, E(1 мбит/сек)–E1(2 мбит/сек), FE(100 мбит/сек)–STM1(155 мбит/сек). Однако при таком выборе не учитывают того факта, что технология работы тех и других сильно отличаются. В трактах ИКМ скорость передачи битов постоянна и жёстко предопределена самим типом ИКМ-тракта. В трактах же для передачи пакетов заявленная скорость передачи в 10;100;1000 мбит/сек определяется скоростью работы управляющего процессора и представляет собой предельную скорость передачи, которую, в действительности, из-за неравномерного следования пакетов невозможно реализовать. Реальная же скорость передачи намного меньше и зависит от многих факторов, которые будут рассмотрены ниже.

Прежде всего, надо отметить, что основу технологии работы ИМ составляет разделение поступающих в ИМ пакетов на фрагменты, число байтов в которых умещается в 125 мк – секундный цикл передачи в ИКМ-трактах. Для того, чтобы осуществлять такое разделение пакета при подготовке этих фрагментов для их передачи через ИКМ-тракт, а затем, на другой стороне, при сборке этих фрагментов в пакет при их приёме из ИКМ-тракта для последующей передачи в тракт передачи пакетов, в ИМ предусмотрены буферные устройства. Эти буферные устройства вносят некоторую задержку в процесс передачи пакетов по составному тракту. Благодаря этой задержке процесс передачи пакетов по ИКМ-тракту выравнивается, а скорость передачи по нему несколько снижается. Если учесть временные факторы процесса передачи пакетов, такие, как времена между моментами поступления пакетов и времена их приёма и передачи, а также учесть технологию работы ИМ и его технические характеристики, такие, как ёмкость буферного устройства, то для передачи пакетов можно выбрать ИКМ-тракт с гораздо меньшей скоростью передачи, чем при упрощенном подходе. А от этого выбора, в свою очередь, зависят и размеры платежей за аренду ИКМ-тракта, так как эта плата очень существенно зависит от скорости передачи.

Из краткого рассмотрения технологии работы ИМ можно сделать вывод, что условия его работы близки к условиям, в которых работает однолинейная система обслуживания с ожиданием и с ограничением времени ожидания. Условием же нормальной работы такой системы является выполнение равенства-неравенства:

$P(\gamma > t_{\text{контр}}) \leq P_{\text{норм}}$, в котором γ – время ожидания начала передачи пакета по ИКМ-тракту, $t_{\text{контр}}$ – предельно допустимое время ожидания, $P(\gamma > t_{\text{контр}})$ – вероятность превышения предельного времени ожидания, $P_{\text{норм}}$ – нормированная (допустимая) вероятность превышения, обычно равная 0,001.

В свою очередь, вероятность такого превышения определяется функциональной зависимостью:

$$P(\gamma > t_{\text{контр}}) = P(\bar{y}; t_{\text{контр}}; \text{закон пост, закон обслуж.})$$

Здесь \bar{y} – средняя интенсивность нагрузки (СИН), пропущенной ИКМ-трактом, за время T , например, за период ЧМН РД ННСГ и равная отношению $(\bar{c} \cdot \bar{t} / T)$. В свою очередь c – среднее число пакетов, передаваемых за T , а t – среднее время передачи пакета по ИКМ-тракту равно отношению \bar{W} / V , где W – среднее число бит в пакетах, а V бит/сек – фиксированная скорость передачи через ИКМ-тракт.

Следует также отметить, что $t_{\text{контр}}$ часто определяют в виде отношения $t_{\text{контр}} / t$. Для ИМ это отношение, по-видимому, численно равно отношению $W_{\text{буф}} / W$, в котором $W_{\text{буф}}$ – ёмкость буферного устройства в битах, так что искомая вероятность означает вероятность переполнения буфера. Из выражения для вероятности также видно, что она зависит не только от численных характеристик процесса передачи, но и от законов поступления пакетов на обслуживание и их ухода после обслуживания, то есть, фактически, от распределения времени между моментами поступления пакетов и от распределения времени их обслуживания. Например, если времена длительностей между очередными занятиями ИКМ-тракта и времена длительностей самих занятий распределены в соответствии с экспоненциальным распределением плотности вероятности их длительностей, то в этом случае для оценки вероятности потери пакетов из-за слишком длительного ожидания (переполнения буфера) можно использовать известную вторую формулу Эрланга для однолинейных систем с ожиданием, параметры в которой были ранее указаны.

$$p(\gamma > t_{\text{контр}}) = y \cdot e^{-\frac{(1-y)t_{\text{контр}}}{t}} = \\ = \left(\left(\frac{c \cdot w}{v} \right) / T \right) \cdot e^{-\left(\frac{c \cdot x \cdot w}{v} \right) / T \cdot x \left(\frac{W_{\text{буф}}}{W} \right)}$$

В таблице 1, построенной по материалам из [1], приведены оценки СИН, пропущенной через ИКМ-тракт, в зависимости от вероятности потерь и от предельного времени ожидания, а в таблице 2 приведены оценки потерь в зависимости от СИН и времени ожидания, определенные по второй формуле Эрланга. Задавая значение потерь, например, $p_{норм}=0,001$ и значением условного времени ожидания, например, $t_{контр} = W_{буф}/W \approx 5$, по таблице 1 можно приближенно определить среднюю интенсивность нагрузки, пропускаемой ИКМ-трактом в заданных условиях и равную 0,09 эрл. Затем, на основе этой оценки, можно определить и нижнюю оценку допустимой скорости передачи по ИКМ-тракту по формуле $V=(CW)/(YT)$. Так, если за каждый промежуток $T=1$ сек будет поступать в среднем по $C=1000$ пакетов, в каждом из которых в среднем по $W=1000$ бит, то при заданных условиях $V_{доп} \geq 11$ мбит/сек. Полученную оценку затем округляют до ближайшего стандартного значения скорости передачи по ИКМ-тракту, то есть до $V=16$ Мбит/сек (2ЦСЛЕ2 или 0,5ЦСЛЕ3).

Таблица 1

Зависимость СИН от потерь и времени ожидания.

$\frac{P}{W}$	0.0001*	0.0005*	0.0010	0.0100	0.1000
0	0.0001	0.0005	0.0010	0.0100	0.1000
1	0.0005	0.0010	0.0030	0.0300	0.2200
2	0.0010	0.0030	0.0090	0.0600	0.3600
3	0.0050	0.0100	0.0200	0.1300	0.4800
4	0.0080	0.0400	0.0500	0.2600	0.5800
5	0.0100	0.0500	0.0900	0.3100	0.6300
10	0.2000	0.3200	0.4000	0.5900	0.7900
20	0.5200	0.6000	0.6700	0.7800	0.8900
50	0.6000	0.7500	0.8600	0.9100	0.9500

Цифры в колонках 0.0001 и 0.0005 определены приближенно

С другой стороны, если по условиям работы составного тракта известна возможная скорость передачи по ИКМ-тракту, например, $V=2$ мбит/сек, а также известны C , W и T , то по формуле $Y_{доп} \leq CW/V/T$ можно определить допустимую СИН, которую может пропустить ИКМ-тракт ($Y \leq 0,5$ эрл), а затем по таблице 1 определить либо $P_{реал} \geq 0,07$ при $t_{контр} = 5$, или $t_{контр} \geq 13$ при $P_{норм} = 0,001$. Из таблицы 1 видно влияние емкости буфера ИМ на допустимые условия работы ИКМ-тракта. При увеличении емкости буфера в два раза ($t_{контр.условн.} = 10$), допустимая СИН увеличивается в 4,4 раза, а допустимая скорость уменьшается в 4 раза ($V \geq 2,5$ Мбит/сек). При уменьшении емкости буфера до 3 допустимая СИН снижается в 4,5 раза (до 0,02 эрл), а допустимая скорость увеличивается в 5 раз ($V \geq 50$ Мбит/сек).

Конечно, реальный процесс передачи пакетов по ИКМ-тракту происходит несколько сложнее. В частности, известно, что число бит в пакете, а следовательно, времена передачи пакетов распределены не по экспоненте, а в соответствии с распределением с «тяжёлым

хвостом». При таком распределении времена передачи меняются в существенно более широких пределах, так что оценка потерь, определённая по формуле Эрланга, будет занижена. Однако в диапазоне разумных значений СИН (до 0.5 эрл) и $t_{контр}$ (более 5) превышение реальной оценки по отношению к расчётной (по формуле Эрланга) составляет не более 2 ($P_{реал} \geq 2P_{расч}$) [2]. Учитывая то, что расчётную оценку скорости округляют в большую сторону, то занижение оценки потерь компенсируется завышением оценки скорости, так что предлагаемый метод оценки скорости передачи на выходе (входе) ИМ по точности оценки является вполне приемлемым, но, в то же время, намного более простым, чем любые другие.

Таблица 2

Зависимость потерь от СИН и времени ожидания

$\frac{y}{W}$	1	2	3	4	5	10	20	50
0.01	0.0037	0.0014	0.0005	0.0002	0.0001	0.0	0.0	0.0
0.05	0.0193	0.0075	0.0029	0.0011	0.0004	0.0	0.0	0.0
0.10	0.0407	0.0165	0.0067	0.0027	0.0011	0.0	0.0	0.0
0.20	0.0899	0.0404	0.0181	0.0082	0.0037	0.0001	0.0	0.0
0.30	0.1490	0.7040	0.0367	0.0182	0.0091	0.0003	0.0	0.0
0.40	0.2195	0.1205	0.0601	0.0363	0.0199	0.0010	0.0	0.0
0.50	0.3032	0.1839	0.1116	0.0677	0.0410	0.0034	0.0	0.0
0.60	0.4029	0.2696	0.1807	0.1211	0.0812	0.0110	0.0	0.0
0.70	0.5186	0.3842	0.2846	0.2108	0.1562	0.0349	0.0017	0.0
0.80	0.6550	0.5363	0.4390	0.3595	0.2943	0.1043	0.0147	0.0
0.90	0.8144	0.7369	0.6667	0.06033	0.5459	0.3311	0.1218	0.0061

Так, например, в энергосистеме на участках сети для передачи сигналов ТУ и ТС были использованы стандартные тракты пакетной передачи Е10 (10 мбит/сек), арендованные у стороннего провайдера. При анализе условий их работы было определено, что для передачи сигналов ТУ и ТС достаточно скорости до 0,8 мбит/сек. С учётом этого для одного из участков сети были приобретены 2 ИМ на базе ЦСП типа ОГМ 30, которые были включены в имеющийся ИКМ-тракт Е1 (2 мбит/сек).

В этом тракте 0.5 ЦСЛ Е1 (каналы Е0 с 1 до 15) была занята под телефонию ($y \approx 4-5$ эрл), а другая 0,5 ЦСЛ Е1 (каналы с 17 по 31 с общей скоростью передачи до 1 мбит/сек) была занята для подключения тракта передачи пакетов Е10 через платы ИМ. В результате, по отзывам диспетчеров качество передачи существенно улучшилось, а платежи за аренду тракта Е10 были прекращены, так что затраты на приобретение двух ЦСП ОГМ-30 с платами ПД, то есть с ИМ, окупились менее чем за четыре месяца.

Литература

1. Х.Штермер и др. «Теория телетрафика» пер. с нем. Связь. М. 1971г.
2. В.В.Крылов и др. «Теория телетрафика...» БХВ-Петербург, СПб, 2005.

Порицкий И.А., ФГБОУ ВПО РГУПС, г. Ростов-на-Дону

Технологическое обеспечение производственного процесса и взаимодействия пользователей в едином информационном

1. Введение

Развитие информационных технологий взаимодействия участников перевозочного процесса способствует повышению качества работы транспортной системы в целом. При осуществлении внедрения средств обработки и передачи информации в транспортные компании возникает ряд проблем: различные платформы (операционные системы), различное аппаратное обеспечение и т.д. В связи с этим, в настоящее время, разработка программного обеспечения направлена на организацию кроссплатформенных решений. Это позволяет добиться оптимальности в таких процессах, как автоматизация документооборота, учет грузов и формальное взаимодействие между участниками перевозки, начиная от ее формирования до полного завершения. Важным фактором при реализации проектов технологического обеспечения является учет систем поддержки принятия решений. Такие системы способствуют снижению ошибок различного рода в технологических процессах.

Организация универсальных межплатформенных программных продуктов в едином информационном пространстве транспортного рынка способствует полному контролю всего технологического процесса без информационных потерь. Плюсы применения таких информационных решений очевидны. В статье рассматривается технологическое обеспечение процесса грузоперевозки с использованием аппаратных средств обработки и передачи данных и кроссплатформенной среды взаимодействия.

2. Обеспечение средствами обработки и передачи информации участников технологического процесса

Следует отметить, что средства обработки и передачи данных должны отвечать современным стандартам.

Сам технологический процесс производства перевозки грузов требует:

1. Максимального уменьшения времени обработки запросов участников при взаимодействии;
2. Наличия средств обработки и передачи информации;
3. Наличия интуитивного графического пользовательского интерфейса GUI в устройствах, которые использует участник (как правило, планируется переход на сенсорные и мобильные устройства);
4. Обеспечения безопасности взаимодействия участников перевозочного процесса;
5. Организации аппаратного сервера с наличием серверного программного обеспечения;
6. Наличия сервера баз данных, включающего систему управления базами данных с возможностью их удаленного администрирования.

Оптимальный вариант выбора серверного аппаратного обеспечения исходит из определения пикового числа запросов пользователей за определенный период времени.

Выбор серверной платформы можно представить в виде математической модели. Пусть α_p – пиковое количество запросов, которое способен выдержать сервер в единицу времени t , а α_{opt} – оптимальное число запросов, стабильно обрабатываемых сервером за t . Тогда, β_n^{us} – количество пользователей, v_n – количество запросов, отправляемых одним пользователем на сервер за t . Зная, что серверная платформа должна определяться, исходя из пикового количества запросов, можно определить общее количество запросов пользователями за t

$$v_{gen} = \frac{(\beta_n^{us} \cdot v_n)}{t}. \quad (1)$$

v_{gen} следует определять эмпирическим путем.

Зная v_{gen} , можно определить среднее количество запросов всех пользователей в единицу времени:

$$v_{gen}^{all} = \sum_1^n v_{gen} / k_t, \quad (2)$$

Где k_t – количество периодов времени, за которые были отправлены и обработаны запросы.

Также необходимо просмотреть v_{gen} за каждый период времени и выбрать максимальный v_{gen}^{max} . Если $v_{gen}^{max} < \alpha_p$ – сервер удовлетворяет условиям работы пользователей. В противном случае необходима дополнительная мощность, которая достигается в промышленных предприятиях путем внедрения второго сервера. Распределение мощностей происходит на основе специализированного программного обеспечения управления нагрузкой. Время обработки запроса зависит от общего числа обрабатываемых и поступающих в обработку запросов и вычислительной мощности сервера.

Средствами обработки и передачи информации на сервер могут служить мобильные устройства на базе операционных систем *Android*, *Windows mobile*, *Mac OS*, *Linux* и др. Как правило, все операционные системы

оснащены браузером по умолчанию. Так как браузер устройств позволяет управлять Веб-документами, запрашиваемыми из сервера, то для обеспечения кроссплатформенности следует создавать программное обеспечение на стороне сервера и обеспечивать безопасный доступ пользователей. Следует учитывать форматирование графического интерфейса на экранах разного размера, поддерживающих разное разрешение с использованием технологий создания веб-приложений (*html5, CSS3, JQuery* и т.д.) Подключение клиентов к серверу можно осуществить путем использования технологий беспроводной передачи данных *Wi-Fi*, либо технологии проводной пакетной передачи данных *Ethernet*. Таким образом, беспроводные сети передачи данных могут облегчить работу сотрудникам на приеме и учете грузов, а проводные – офисным работникам, имеющим стационарные вычислительные машины (персональные и промышленные компьютеры). Схема подключения устройства клиента к серверу представлена на рис.1.

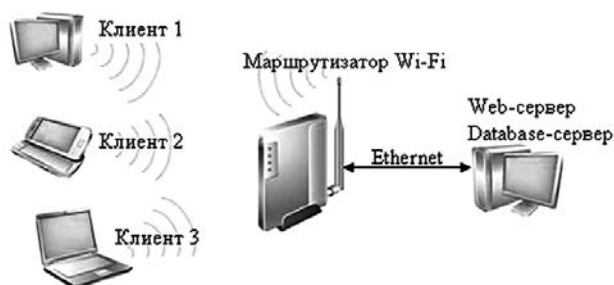


Рис.1. Подключение устройства клиента к серверу

Само подключение должно происходить с использованием расширения протокола передачи гипертекста с поддержкой шифрования *https*.

При разработке графических интерфейсов пользователей транспортного рынка необходим учет их профиля. Предполагается, что регистрация пользователя в системе включает обязательный пункт «профиль пользователя». Далее система автоматически распознает профиль пользователя при каждом входе в нее через логин и пароль. Для участников единого информационного пространства характерны профили:

1. Грузоотправитель
2. Грузоперевозчик
3. Грузополучатель
4. Экспедитор
5. Складской работник
6. Работник грузового терминала
7. Работник таможенного контроля
8. Планировщик (логист)
9. Бухгалтер

Интерфейс каждого профиля должен обладать набором специализированных графических элементов,

содержащих информацию, присущую только этому конкретному профилю. Если этого не учитывать, то будет нарушена общая целостность организации работы транспортной системы, что в дальнейшем может привести к появлению критических ошибок и сбоев, как следствие потери прибыли.

Организация динамического процесса передачи запроса и обработки его сервером реализуется с помощью форм на веб-страницах, которые предназначены для обмена данными между участниками процесса грузоперевозки и сервером. На сервере должна быть реализована база данных с набором электронных таблиц и программное обеспечение обработки запросов. Обработка запроса должна происходить перед тем, как данные попадут в базу и на анализ участникам, для которых адресованы данные этого запроса. База данных должна поддерживать все типы данных, используемых в работе сотрудников транспортных компаний и участников перевозочного процесса. В настоящее время такие базы, а также системы управления предлагает компания – мировой поставщик *Oracle*. Для обработки данных участников транспортного рынка в едином информационном пространстве вполне достаточно использовать базу данных *MySQL*, включающую язык структурированных запросов *SQL*.

Безопасность доступа пользователя к системе должна быть основана на использовании алгоритмов шифрования данных по принципу сравнения пароля пользователя, вводимого с клавиатуры, с хэш-функцией, хранящейся в базе данных. Приемлемыми являются алгоритмы шифрования *SHA(secure hash algorithm)*, используемые в работе государственных, федеральных органов и крупных промышленных предприятий. Кроме того, доступ к системе может производиться путем проверки *IP* и *MAC*-адресов устройств, зарегистрированных и работающих в системе. Подключение внутренних пользователей (сотрудников транспортных предприятий) может осуществляться через внутренние сети Интранет. Внешние пользователи допускаются к работе в системе через глобальную сеть Интернет.

Разработка программного обеспечения системы управления технологическими процессами грузоперевозок может происходить как на центральном сервере с использованием удаленного доступа, так и на локальном сервере с последующим переносом. В качестве локального сервера можно использовать персональный компьютер разработчика, который может принципиально отличаться от сервера, как функциями, так и производительностью. Тестирование программ следует выполнять на центральном сервере, так как его предельная мощность существенно отличается от персональных компьютеров.

В результате наличия целостной системы, имеющей аппаратное и программное обеспечение, формирование запросов при производстве технологического процесса грузоперевозок станет более удобным и гибким для его участников. Это позволит сэкономить время, миновав производство бумажных документов, поставив на первое место организацию движения груза в материальном потоке, а не его оформление.

3. Некоторые технологии взаимодействия пользователей в едином информационном пространстве

В основе организации взаимодействия пользователей в едином информационном пространстве лежит выявление их функций. Некоторые функции пользователей информационной системы единого информационного пространства представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Функции участников транспортного рынка в едином информационном пространстве

Участник	Функции
Грузоотправитель	<ol style="list-style-type: none"> 1. Поиск свободных транспортных средств. 2. Размещение информации об имеющемся грузе на обозрение 3. Размещение данных о местонахождении груза и своих реквизитов 4. Поиск места размещения на складе 5. Заключение договоров на перевозку
Грузоперевозчик	<ol style="list-style-type: none"> 1. Поиск свободных грузов, удовлетворяющих перевозке в конкретном транспортном средстве 2. Размещение информации о транспортном средстве, месте дислокации и реквизитах участника 3. Заключение договоров на перевозку
Экспедитор	<ol style="list-style-type: none"> 1. Поиск клиентов 2. Заключение договора на услуги контроля груза 3. Контроль груза с использованием систем глобального позиционирования 4. Заполнение электронных таможенных деклараций
Грузополучатель	<ol style="list-style-type: none"> 1. Мониторинг дислокации груза 2. Контроль графика доставки 3. Контроль состояния груза во время перевозки
Работник таможенной службы	<ol style="list-style-type: none"> 1. Проверка правильности заполнения таможенных деклараций 2. Проверка вспомогательных документов
Складской работник	<ol style="list-style-type: none"> 1. Анализ параметров груза и подготовка места на складе 2. Оформление электронных документов на хранение груза 3. Слежение за состоянием груза в процессе хранения
Работник терминала	<ol style="list-style-type: none"> 1. Контроль подвода транспорта для перевалки грузов 2. Оформление соответствующих документов
Логист	<ol style="list-style-type: none"> 1. Планирование организации перевозочного процесса 2. Прогнозирование спроса на перевозки

Представленные и другие функции должны коррелировать между участниками перевозочного процесса во время его проведения. Например, заключение до-

говора фигурирует сразу между несколькими сторонами процесса, а значит для каждого из них должны быть представлены его различные элементы. Условно, математически заполнение документов можно смоделировать в виде процентного соотношения между сторонами. Пусть имеется договор, который заключается между грузоотправителем – А, грузоперевозчиком – В и грузополучателем – С. Тогда, x_n – количество данных, заполняемых А, y_n – В, z_n – С. В случае полного заполнения данных в договоре участником А, касаемых его полномочий, общее количество заполнения договора будет равняться 33,3%. Полное заполнение документа можно записать как:

$$x_n \cup y_n \cup z_n = 100\% . \tag{3}$$

При организации взаимодействия пользователей в едином информационном пространстве с помощью систем документооборота должны учитываться виды маршрутизации документов: жесткая маршрутизация; нечеткая маршрутизация. Жесткая маршрутизация предполагает заранее установленный маршрут следования документов с учетом всех операций. Нечеткая маршрутизация может рассматривать разные маршруты следования между сотрудниками одних и тех же документов.

Маршрут следования можно представить в виде технологической сети, где вершины – сотрудники, а векторы – путь документа. Сотрудники должны иметь сущность «специализация» и быть устойчивыми. Маршрут следования по векторам должен выбираться в зависимости от типа документа.

4. Вычислительный эксперимент обработки документов

Для вычислительного эксперимента использовалась технология «Клиент-сервер» с подключением пользователей через Wi-Fi. В качестве серверной операционной системы выбиралась *Kubuntu 14.04* с серверным пакетом *apache2*, базами данных *MySQL*, и серверным языком программирования *PHP5.0*. Целью вычислительного эксперимента являлось определение времени обработки документа одним пользователем, и отправки его для дальнейшей обработки по маршруту. Учитывалось время загрузки документа в браузер пользователя, обработка пользователем, и отправка на сервер. Количество итераций заполнения пользователем – 3.

При запуске браузерного приложения пользователь делал запрос серверу для заполнения конкретного документа. В качестве документа была принята транспортная накладная с сущностями: тип вагона, номер вагона, груз, код груза, грузоотправитель, грузоперевозчик, вес груза, объем груза, место отправления, правила хранения груза при перевозке и складирова-

нии, время прибытия, дата прибытия на станцию грузополучателя.

Заполнение электронной транспортной накладной было реализовано с помощью *Web*-интерфейса и браузера. Аппаратное обеспечение сервера: *Intel Celeron G540, 2,50GHz, 1GB ОЗУ*.

Для обработки документов на сервере была организована система управления базами данных *MySQL* с графическим интерфейсом *phpMyAdmin*. Создание базы хранения электронных накладных предопределяло следующие типы данных, описанные в таблице 2.

Таблица 2.

6	Nokia Lumia 520 (Mozilla 5.0)	0,078	3,20	0,016
		0,054	3,00	0,016
		0,059	1,25	0,019
7	LG P715 (Safari/534.30)	0,11	3,13	0,014
		0,097	1,25	0,014
		0,065	1,15	0,01
8	Iphone 5S (Safari/600.1.4)	0,025	2,54	0,002
		0,01	2,44	0,002
		0,012	2,55	0,02
9	HTC One dualism (Mozilla5.0)	0,049	3,13	0,02
		0,06	1,40	0,03
		0,043	1,36	0,004
10	Apple Ipad (Safari/600.1.4)	0,017	2,50	0,016
		0,03	2,10	0,017
		0,05	2,08	0,011

Типы данных электронной накладной

Сущность	Тип	Длина (симв.)
Номер вагона	Int	8
Тип вагона	Varchar	100
Наименование груза	Varchar	150
Код груза	Int	7
Вес груза	Int	7
Объем груза	Int	7
Место отправления	Varchar	100
Отправитель	Varchar	100
Перевозчик	Varchar	100
Хранение груза	Varchar	100
Время прибытия (час, мин)	Int	3
Дата прибытия(ДД.ММ.ГГГГ)	Int	3.3.5

В эксперименте участвовало 10 независимых экспертов с разными мобильными устройствами обработки и передачи информации. Результаты работы сведены в таблицу 3.

Таблица 3.

Результаты эксперимента

№ эксперта	Устройство (Браузер)	Время входа в систему (сек)	Время заполнения документа (мин)	Время обработки документа (сек)
1	HTC Mozart (Mozilla5.0)	0,115	3,07	0,02
		0,084	1,57	0,025
		0,09	1,58	0,026
2	Sony Xperia S (Mobile Safari/537.36)	0,077	3,20	0,024
		0,029	2,50	0,006
		0,046	2,45	0,012
3	Nokia Lumia 620 (Mozilla 5.0)	0,049	2,50	0,043
		0,043	2,01	0,019
		0,035	1,58	0,022
4	Iphone 5S (Safari/600.1.4)	0,09	2,21	0,007
		0,017	1,52	0,01
		0,029	1,40	0,013
5	Samsung GTi 9003 (MobileSafari/533.1)	0,077	2,49	0,016
		0,054	2,46	0,008
		0,037	1,51	0,019

На всех браузерах устройств-клиентов, использующихся в эксперименте, пользователи получили одинаково отформатированную страницу с данными (электронной накладной), что показывает стабильность работы информационной системы, организованной по вышеописанным принципам для обеспечения кроссплатформенности. Исходя из табличных данных, можно увидеть, что интервал записи данных пользователем в один документ составил от 1 мин. 30 с до 3 мин. 20 с, а передача на сервер представлялась меньше 1 с. Это говорит о колоссальной экономии времени в отличие от времени заполнения и передачи бумажного документа между участниками.

Данный эксперимент показывает, что организация информационной системы с применением компьютерных сетей и технологии беспроводной передачи данных в едином информационном пространстве транспортной промышленности способствует качественной организации работы в модулях 2 уровня (специализированных промышленных предприятиях) с персоналом, тонко разбирающимся в производственном и технологическом процессах организации материального потока [2].

Литература

1. Мамедова, Л. Единая автоматизированная система электронного документооборота (ЕАСД) в ОАО РЖД [Сайт «Текора», технологии корпоративного развития], URL: <http://www.tekora.ru/Projects/easd/> (дата обращения: 20.09.2013).
2. Порицкий, И.А. Многоуровневое обеспечение логической безопасности авторизации в информационных системах коллективного пользования / И.А. Порицкий.// Труды Междунар. науч.-практ. конф. «Транспорт-2013». Ч-1. Технические и экономические науки / Рост. гос. ун-т. путей сообщения. – Ростов н/Д., 2013. – 316 с.
3. Сергеев, В.И. Корпоративная логистика. 300 ответов на вопросы профессионалов / В.И. Сергеев – М.: ИНФРА-М, 2005. – 976 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Приветствие от Российского фонда фундаментальных исследований	3
---	---

СЕКЦИЯ №1

УПРАВЛЕНИЕ ПЕРЕВОЗОЧНЫМ ПРОЦЕССОМ, ПЛАНИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПЕРЕВОЗОК	4
--	----------

Матюхин В.Г., Шабунин А.Б. Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте – 2014	4
--	---

Архипов Д.И., Лазарев А.А. Минимизация максимального взвешенного временного смещения для заказов на доставку грузов между двумя станциями в условиях ограниченного движения составов	7
---	---

Цельсова А.Ю., Хоботов Е.Н. Разработка методики формирования маршрутов и расписаний движения грузовых поездов по железнодорожной сети	11
--	----

Капустин Н.И. Технологическая архитектура принципов управления эксплуатационной работой на железной дороге в ПТК ИСУЖТ	15
---	----

Бородин А.Ф., Сайбаталов Р.Ф. Методы устранения эксплуатационных затруднений на основе оценки манёвренности и вариантных технологических режимов работы полигонов железнодорожной сети	20
---	----

Захарова Е.М., Минашина И.К. Разработка и анализ алгоритмов оптимизации в задачах планирования на железнодорожном транспорте.....	24
--	----

Ерофеев А. А., Старинская Н. А., Прудников П. Н. Интеллектуальные технологии в оперативном планировании грузовой работы белорусской железной дороги	30
--	----

Абрамов А.А., Немцов Э.Ф., Еремин А.С. Автоматизация разработки графиков движения поездов на основе мультиагентных технологий	34
--	----

Машталер Ю.А., Матвиенко В.А., Алтунин В.П., Такмазьян А.К. Мультиагентное решение задачи о суточном планировании назначения локомотивных бригад на явку в депо	39
--	----

Ефремов Г.А., Ефремова А.П. Управление движением поездов на полигонах Октябрьской дороги с помощью интеллектуальных многоагентных систем	43
---	----

Рябых Н.Г., Захарова Е.М., Минашина И.К., Корчагин Т.А. Реализация привязки поездов на нитки вариантного графика с помощью решения задачи о назначениях	48
--	----

Хавторин А.М. Учет загрузки инфраструктуры для принятия решения о согласовании уведомлений о предъявлении порожних вагонов для перевозки	52
---	----

Кан Ю.С., Кибзун А.И., Иванов С.В. Оптимизационная модель назначения локомотивов для перевозки грузовых составов	54
---	----

Машталер Ю.А., Матвиенко В.А., Алтунин В.П., Такмазьян А.К., Захарова Е.М. Планирование и мониторинг содержания локомотивов на установленную сменно-суточную потребность	58
---	----

Феофилов А.Н. Концепция интеллектуальной системы оперативного управления парком грузовых вагонов	62
---	----

Залуцкий М.И. Совершенствование алгоритмов расчета перерабатывающей способности станций и железнодорожных путей необщего пользования в автоматизированных системах	65
---	----

Рубцов Д.В., Галкин А.О. Автоматизированная подготовка предложений по организации вагонопотоков на железнодорожном полигоне на основе исполненных вагонопотоков и ограничений инфраструктуры	67
---	----

Матюхин В.Г., Шабунин А.Б., Ефремов Г.А., Ефремова А.П., Тимченко А.Д. Когнитивные технологии в проектах автоматизации диспетчерского управления на железнодорожном транспорте	71
---	----

СЕКЦИЯ №2

КОМПЬЮТЕРНОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТНЫХ ПРОЦЕССОВ И СИСТЕМ, МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕВОЗОЧНОГО ПРОЦЕССА И ТРАНСПОРТНОЙ ЛОГИСТИКИ	74
---	-----------

Мороз А.И. Логико-динамическая модель и проблема разработки интеллектуальной системы управления железнодорожным транспортом	74	Розенберг И.Н. Системная интеграция базовых технологических элементов ИСУЖТ в задачах управления инфраструктурой и обеспечения безопасности движения	110
Захарчук О.Т. Фундаментальная модель описания организационно-технических систем	79	Смирнова Е.И., Товмасын В.М., Бутырин П.А., Шакирзянов Ф.Н. Основные материалы и узлы двухканального оптико-электронного прибора	116
Шапкин И.Н., Обухов А.Д. Вопросы интеллектуализации перевозочного процесса на железнодорожном транспорте	81	Попов А.М., Зайцев С.М., Лабутин Т.А., Зоров Н.Б., Дюндин В.В., Кузнецов А.А. Использование лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии для оценки прочностных свойств сварных стыков рельсового пути	119
Устич П.А., Иванов А.А., Чернышова Л.М., Устич Д.П. Математическая модель железнодорожного транспорта как важный инструмент построения эффективной системы интеллектуального управления этой отраслью	83	Карабутов А.А., Подымова Н.Б., Ксенофонтов Д.М., Жаринов А.Н., Бобров В.Т., Симонова В.А., Мальцев В.Н. Анализ возможностей создания системы бесконтактной высокоскоростной лазерно- ультразвуковой дефектоскопии рельсов	122
Сотников Е.А. Интеллектуализация оперативного управления перевозочным процессом на уровне региональной дирекции управления движением	94	Капустин М.Ю., Космодамианский А.С. Применение адаптивных систем управления для автоматизации процесса прицельного торможения электропоезда	127
Ивутин А.Н., Ларкин Е.В., Усов С.В. Моделирование систем с активным резервированием при нестационарных потоках отказов	96	Розенберг И.Н., Дулин С.К. Семантическая геоинтероперабельность — основа интеллектуализации корпоративного доступа к геоданным	131
Григорьянц А.Г., Ставертий А.Я., Третьяков Р.С., Усов С.В. Компьютерное моделирование формы насадок для коаксиальной подачи материалов с целью управления ресурсом деталей железнодорожной техники	98	Михайлов С.В. Определение оптимальной скорости проведения испытаний по воздействию подвижного состава на путь	135
Петров И.Б., Хохлов Н.И., Миряха В.А., Санников А.В., Фаворская А.В. Численное моделирование волновых и деформационных процессов в элементах железнодорожного пути	102	Савостин А.А., Алейников А.А., Михайлов С.И., Василейский А.С. Методика тематической обработки данных спутниковой съемки при мониторинге экзогенных воздействий на железнодорожную инфраструктуру	137
Давыдов Б. И. Концепция двухэтапности процесса адаптивного управления движением грузовых поездов	105	Василейский А.С., Карелов А.И. Верификация результатов радиолокационного мониторинга геодинамических процессов на участке Туапсе–Адлер	142
СЕКЦИЯ №3		Карацуба Е.А., Адуенко А.А., Рейер И.А., Кузнецов М.П., Стрижов В.В. Мониторинг состояния железнодорожных объектов и инженерных сооружений по спутниковым снимкам	151
УПРАВЛЕНИЕ ИНФРАСТРУКТУРОЙ. СПУТНИКОВЫЕ И ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В УПРАВЛЕНИИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ	110		

Вакуленко С.П., Ларин О.Н., Шарапов Д.К. Использование технологий радиочастотной идентификации в системах доставки грузов	155	Долгий А.И., Хатламаджиян А.Е., Кудюкин В.В. Развитие технологии технического зрения для решения комплексных задач на железнодорожном транспорте	197
Розенберг И.Н., Беляков С.Л. Методы и средства образного представления знаний для принятия решений с использованием геоинформационных систем	157	Ермаков А.Н., Меркулов А.А., Панфилов С.А., Райков А.Н. Экспертно-аналитический тренажер для формирования компетенций по поддержке решений в аварийных условиях на железной дороге	200
СЕКЦИЯ №4		Корниенко А.А., Диасамидзе С.В., Глухарев М.Л., Захарченко С.С., Поляничко М.А. Разработка методологии, методического и программно-алгоритмического обеспечения процессов обнаружения и разрешения конфликтов в комплексах программных средств защиты от кибератак на железнодорожном транспорте	204
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СЛОЖНЫХ СИСТЕМАХ. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТЬЮ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ	161	Шухина Е.Е., Кисельгоф Г.К., Астрахан В.И., Попов П.А. Методы и технические средства обмена оперативной информацией между центрами управления ИСУЖТ и бортовыми устройствами управления и безопасности	208
Розенберг Е.Н. Интеллектуальная поддержка решения задач ИСУЖТ средствами железнодорожной автоматики нижнего уровня	161	Юренко К.И., Савоськин А.Н., Фандеев Е.И. Исследование оптимальных траекторий движения поездов с учетом влияния случайных факторов	211
Махутов Н.А., Гаденин М.М., Соколов А.М., Титов Е.Ю. Основы анализа рисков природно-техногенных опасностей и их мониторинг для объектов железнодорожного транспорта	168	Юренко К.И., Шепилова Е.Г., Гречук И.А. Имитационное моделирование режимов движения поезда на базе тренажеро-моделирующих комплексов	214
Кибзун А.И., Игнатов А.Н., Платонов Е.Н. Методология оценки и минимизации рисков на железнодорожном транспорте	177	Сергеев Б.С., Харитонов И.В. Интеллектуальные возможности применения светодиодных систем на локомотивах железнодорожного транспорта	217
Горелик А.В., Веселова А.С., Журавлев И.А. Модель оценки функциональной надежности объектов транспортной инфраструктуры	180	Волынская А.В., Сапожников И.В. Теория, компьютерное моделирование и схемные решения адаптивного канала телеуправления с применением шумоподобных сигналов	220
Язенин А.В., Гришина Е.Н., Рыжова М.Н., Солдатенко И.С., Сорокин С.В., Иванова Е.И., Судаков А.Г., Ханьгин М.А., Михайлов В.В. Интеллектуальная система диагностики и прогнозирования состояния вагонного электрооборудования методами дата майнинга	184	Егоров В.Б. Выбор ИКМ-трактов для передачи пакетов	224
Захаров А.В., Кольцов П.П., Кравченко А.А., Котович Н.В., Куцаев А.С., Осипов А.С. О технологии сравнительного анализа программно-технических решений в области обработки визуальной информации в интересах ОАО «РЖД»	187	Порицкий И.А. Технологическое обеспечение производственного процесса и взаимодействия пользователей в едином информационном	226
Каркищенко А.Н., Мнухин В.Б., Абраменко А.А., Гречухин И.А., Левашев С.П. Распознавание объектов железнодорожной инфраструктуры по данным лазерного сканирования	193	СОДЕРЖАНИЕ	231

ТРУДЫ

Третьей научно-технической конференции с международным участием
**Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте.
Компьютерное и математическое моделирование.
ИСУЖТ-2014**

Общая редакция сборника трудов конференции

доктор технических наук
Матюхин В.Г.,

доктор технических наук
Строгонов В.И.

Дизайн, компьютерная верстка
Терёшкин С.Б., Фесенко А.В.

Подписано в печать _____ г. Формат 60x90½
Гарнитура Миньон Про. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 29. Тираж 200 экз. Заказ № _____

Открытое акционерное общество
«Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт
информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте»
ОАО «НИИАС»
Дочернее общество ОАО «РЖД»

Россия, 109029, Москва, Нижегородская ул., 27, стр. 1
Тел./факс: +7 (495) 967-77-02
E-mail: isuzht@vniias.ru

www.vniias.ru