На правах рукописи

Федянин Денис Николаевич

Модели информационных процессов в рефлексивном управлении активными сетевыми структурами

Специальность 2.3.8 —
«Информатика и информационные процессы»

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Москва — 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук (ИПУ РАН).

Научный руководитель:	доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории 57 ИПУ РАН **Чхартишвили Александр Гедеванович**
Официальные оппоненты:	**Угольницкий Геннадий Анатольевич**, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики и программирования Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет»
	Судаков Владимир Анатольевич, доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук»
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр **«Карельский научный центр Российской академии наук»**

Защита состоится 12 мая 2025 года в 16:00 на заседании диссертационного совета 24.1.107.03 при Институте проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук по адресу: 117997 Москва, ул. Профсоюзная, 65.
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПУ РАН и на сайте www.ipu.ru.
Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.1.107.03, д-р техн. наук, доцент. Барабанова Елизавета Александровна

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Активные сетевые структуры (АСС) – это структуры, состоящие из множества агентов (индивидуальных и коллективных субъектов, обладающих свойством активности – способности к самостоятельному выбору определенных целей и действий) и определенного на нем множества тех или иных связей. Частными случаями АСС являются онлайновые социальные сети, сети экономических агентов, сети оборудованных взаимодействующими датчиками транспортных средств. Действия агентов зависят от их информированности, поэтому одним из видов управления АСС является рефлексивное управление – формирование управляющим органом (центром) нужной ему информированности (в том числе взаимной информированности).

Моделирование взаимной информированности агентов и информационных процессов в АСС осуществлялось и осуществляется в рамках различных научных направлений.

В рамках эпистемической логики (С.А.Крипке, Я.Хинтикка, A.Baltag, S.Smets, van Benthem и др.) исследовались вопросы моделирования информированности и ее изменения. В рамках теории игр (Дж. Нэш, В.Н. Бурков, Д.А.Новиков, Дж. Харшаньи, Ю.Б. Гермейер, Г.А.Угольницкий и др.) ключевым является вопрос принятия решений агентами в конфликтной ситуации. В сетевых играх и играх на сетях (R. Tatko, Н.А.Зенкевич, В.В.Мазалов, Ч. Ван, Ц. Гао, Е.М.Парилина, M.O. Jackson, Д.А.Губанов, Д.А.Новиков, А.Г.Чхартишвили и др.) исследовались сетевые аспекты информационного взаимодействия агентов. В эпистемических и рефлексивных играх, а также моделях рефлексивного управления (P. Ауманн,J. van Benthem, P. Weirich, B. De Bruin, A. Brandenburger, A.Perea, A. Baltag,В.А.Лефевр, В.Е. Лепский, Д.А.Новиков, А.Г. Чхартишвили и др.) упор был сделан на сложную взаимную информированность агентов. Отметим также научное направление, связанное с разработкой логико-игровых моделей социальных процессов (A.Baltag, S.Smets, Z. Cristoff, R.K. Rendsvig, F. Liu и др.).

Одной из существенных проблем моделирования информированности и информационных процессов в АСС, которая присуща перечисленным выше научным направлениям, является возможность различного количества и состава агентов в субъективных представлениях. Иными словами, обычно со-

став участников ситуации считается фиксированным и общеизвестным, что не всегда соответствует реальным ситуациям с неполной информированностью. Таким образом, актуальной является разработка более общих моделей информационных процессов рефлексивного управления в АСС, учитывающих в том числе и этот аспект.

Объектом исследования в диссертационной работе являются активные сетевые структуры (АСС), **предметом исследования** — информационные процессы рефлексивного управления в АСС.

Целью данной работы является обеспечение возможности рефлексивного управления в условиях неполной взаимной информированности агентов о составе АСС на основе разработки и исследования моделей информационных процессов.

Для достижения цели работы были решены следующие **задачи**:

1. Проведен анализ и систематизация моделей информационных процессов в рефлексивном управлении АСС (гл. 1).
2. Разработана модель информированности и информационного равновесия на ее основе в условиях неполной взаимной информированности агентов о составе системы, способствующей поддержке принятия решений при рефлексивном управлении (гл. 2).
3. Разработаны и исследованы алгоритмы построения и трансформации структуры информированности в АСС (гл. 2).
4. Разработаны прикладные модели неполной взаимной информированности для рефлексивного управления в социальных, экономических, технических системах (гл. 3).

Методы исследования. В основе исследования лежит аппарат современной теории управления, в частности подходы и результаты теории игр, теории активных систем, теории рефлексивного управления, теории принятия решений и исследования операций.

Основные положения, выносимые на защиту:

– Модель обобщенной множественной структуры информированности (ОМСИ) и информационного равновесия на ее основе в условиях неполной взаимной информированности агентов о составе системы для поддержки принятия решений на различных уровнях управления.

– Алгоритм построения и трансформации обобщенной множественной структуры информированности.
– Прикладные модели информированности и принятия решений в социальных, экомических, технических системах, которые обеспечивают возможность рефлексивного управления при неполной взаимной информированности агентов о составе АСС.

Научная новизна:

– Построена модель информированности и информационных процессов (ОМСИ) в виде, который позволяет выявлять закономерности обмена информацией в условиях неполной взаимной информированности агентов о составе системы для поддержки принятия решений на различных уровнях управления (пункт 1 паспорта специальности 2.3.8).
– Разработаны алгоритмы построения и трансформации структуры информированности и принятия решения на основе ОМСИ (пункт 6 паспорта специальности 2.3.8), позволяющие учесть неполную взаимную информированность агентов о составе системы.
– Предложены методы моделирования информированности с помощью ОМСИ в различных предметных областях, которые обеспечивают адекватное и наглядное описание взаимной информированности агентов о составе системы (пункт 16 паспорта специальности 2.3.8).

Теоретическая и практическая значимость состоит в том, что разработанные методы рефлексивного управления АСС позволяют учитывать сложную взаимную информированность агентов о составе моделируемой системы. Практическая значимость состоит в применении этих методов для решения задач рефлексивного управления в различных предметных областях, таких как управление беспилотными подводными аппаратами, управление безопасностью городской транспортной системы, управление мнениями в социальных сетях и др.

Эффективность использования разработанных в диссертационной работе моделей и методов рефлексивного управления АСС подтверждена актом и справкой о внедрении.

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректностью применяемых математических методов и численных расчетов.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на: международной конференции IFAC International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT2022); международных конференциях «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD2018, MLSD2021); международных конференциях по системам управления, математическому моделированию, автоматизации и энергоэффективности (SUMMA2020, SUMMA2021); международных конференциях «Теория игр и приложения» (GTM 2016, 2017); международных конференциях «Формальная философия» (2021, 2022); симпозиуме «Рефлексивные процессы и управление» (2013); конференциях МФТИ (2014, 2015, 2016, 2017, 2018); конференциях «Управление большими системами»(2014,2023); конференциях МКПУ (2016, 2017, 2018); научных семинарах ТУОС ИПУ РАН и ВЦ РАН.

Личный вклад. Все результаты получены автором самостоятельно.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 15 печатных изданиях, 4 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 4 — в журналах, индексированных Scopus , 7 — в докладах, индексированных Scopus или Web of Science.

Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность проведенных в данной диссертационной работе исследований, сформулированы цель, задачи работы, её научная новизна, теоретическая и практическая значимость. Также во введении уточняется понятие информированности, а именно: под информированностью в работе понимается множество возможных миров, т.е. миров которые агент считает возможными, или вероятностное распределение на нем. Общие понятия возможного мира и состояния природы конкретезируются в каждой частной модели:

- в модели когнитивной инерции состоянием природы является последовательность произошедших с момента наблюдения значимых для агентов событий,
- в модели частичной наблюдаемости состояниями природы являются значения бинарного вектора параметров,

- в модели скрытых коалиций состоянием природы является разбиение агентов на скрытые коалиции,
- в модели взаимодействия упрямых агентов состоянием природы является значение неизвестных параметров игры,
- в модели поляризации агентов и в модели ограниченного доверия состоянием природы является значение некоторого параметра мира, например, желаемой доли бюджета на образование,
- в модели распространения согласия с утверждениями состоянием природы является непротиворечивое подмножество логических формул из заданного множества формул,
- в модели активной транспортной системы состоянием природы является расположение транспортных средств,
- в модели скрытого поиска состоянием природы является расположение АНПА (автономный необитаемый подводный аппарат) и информация о том, найден ли объект.

Введение также содержит пояснения относительно механизмов принятия решений агентами: поведение агентов считается равновесным (т.е. соответствующим ситуации, от которой никому из них невыгодно отклоняться), причем рассматриваются только некооперативные игры, т.е. все агенты принимают решения одновременно и независимо, поэтому решение не коллективное, а индивидуальное (кроме модели явных и скрытых коалиций).

Первая глава содержит обзор различных подходов к моделированию информированности агентов и рефлексивному управлению в условиях неполной взаимной информированности агентов. На основании этого обзора проведено сопоставление между модельными структурами различного типа. Показано, что в рамках известных моделей не выработано способов моделирования ситуации с неопределенностью относительно состава участников ситуации.

Вторая глава посвящена построению и исследованию обобщенной множественной структуры информированности (ОМСИ), позволяющей решить одну из существенных проблем моделирования информированности, а именно: обеспечения возможности существования различного количества и состава агентов в субъективных представлениях. Предлагаемый подход позволяет рассчитать равновесные состояния активной системы.

В разделе 2.1 описан способ решения задач методом редукции ОМСИ, в том числе следующие алгоритмы: алгоритм преобразования в модальную логику, алгоритм скрытия миров, алгоритм скрытия агентов, алгоритм сведения к конечной ОМСИ, алгоритм устранения многозначности. Также доказана теорема об эквивалентности ОМСИ и отмеченных структур Крипке для регулярных структур.

ОМСИ может быть интервальной и вероятностной. Ниже даны формальные определения обоих вариантов. Введем следующие множества и отображения:

Θ – множество возможных состояний природы, т.е. состояний природы, которые агенты могут считать возможными;

$A = \{a_1,\ldots,a_n\}$ – множество агентов;

$\Omega = \{\omega_1,\ldots,\omega_k\}$ – множество возможных миров, т.е. миров, которые агенты могут считать возможными;

$\omega^* \in \Omega$ – реальный мир;

$\theta(\omega)$ – функция, ставящая в соответствие возможному миру характеризующее его состояние природы: $\omega \in \Omega, \theta(\omega) \in \Theta$;

$\xi(\omega)$ – функция, ставящая в соответствие возможному миру множество присутствующих в нем агентов: $\omega \in \Omega, \xi(\omega) \subseteq A$;

$\eta(a)$ – функция, ставящая в соответствие каждому агенту множество миров, которые он считает возможными: $a \in A, \eta(a) \subseteq \Omega$.

Агент $a \in A$ является реальным, если $a \in \xi(\omega^*)$; в противном случае он является фантомным. Отметим, что в прикладных моделях множество реальных агентов часто обозначается множеством $N = \{1,\ldots,n\}$, т.е. $n = |\xi(\omega^*)|$.

Также должны выполняться условия идентичности агента и связности миров, которые аналогичны условиям для классической множественной структуры информированности.

Элементы кортежа A, Ω, $\xi(\omega)$, $\eta(a)$ задают граф $G = (V, E)$ интервальной обобщенной множественной структуры информированности, определенной выше. Множество вершин графа интервальной обобщенной множественной структуры информированности определяется как

$$V = A \cup \Omega,$$

а множество ребер как

$$E = \{(a, \omega) \in A \times \Omega : a \in \xi(\omega)\} \cup \{(\omega, a) \in \Omega \times A : \omega \in \eta(a)\}.$$

Другими словами, граф ОМСИ — это двудольный граф: доля A – это агенты, доля Ω - миры. От агентов ведут ребра к тем мирам, в которых они присутствуют, от мира идут ребра к тем агентам, которые считают этот мир возможным.

Определение 2.1.2. Назовем вероятностной обобщенной множественной структурой информированности (вероятностной ОМСИ) кортеж (см. [1]).

$$I_{prob} = (\Theta,\Omega,\omega^*,A,\theta(\omega),\xi(\omega),\eta(a), p^{\omega}(a)),$$

где

$$\sum_{\omega \in \eta(a)} p^{\omega}(a) = 1,$$

для которого выполнены условия идентичности агента и связности миров. Граф $G = (V, E)$ вероятностной обобщенной множественной структуры информированности определяется аналогично графу интервальной обобщенной множественной структуры информированности.

Аналогично интервальной ОМСИ, вероятностная ОМСИ характеризует информированность следующим образом: множество возможных миров задается множеством Ω, в нем выделяется реальный мир ω^*, в каждом возможном мире выделяются агенты, присутствующие в нем, $\xi(\cdot)$, и для каждого такого агента задаются миры, которые именно он считает возможными, $\eta(\cdot)$. Также задается множество возможных состояний природы Θ и для каждого мира указываетсякакое в нем состояние природы $\theta(\omega)$. В отличие от интервальной ОМСИ, задается также вес $p^{\omega}(a)$ ребра от к возможного мира ω к агенту a, описывающий субъективную вероятность истинности возможного мира с точки зрения агента. Представление информированности в этом виде позволяет ввести различные равновесия, в том числе находить равновесия Байеса–Нэша в чистых стратегиях, формально описать динамику и решать задачи управления.

В дальнейшем под ОМСИ (без уточнения) будем иметь в виду и интервальные, и вероятностные, используя единое обозначение I.

Для описания ситуаций принятия решений будем считать, что у каждого агента $a_i, i \in N$, имеется множество допустимых действий X_i. Свои действия агенты выбирают одновременно и независимо (т.е. рассматривается игра в нормальной форме). У агента a_i имеется целевая функция в каждом мире ω, который он считает возможным: $f_i^\omega(\theta,x_i,x_{-i}^\omega)$, где $\omega \in \eta(a_i), x_i \in X_i$, а через x_{-i}^ω обозначен набор действий агентов из множества $\xi(\omega)\backslash\{i\}$. Назовем информационным равновесием набор $x_i \in X_i, i \in N$, для которого выполнены следующие условия (см. [1]):

$$x_i \in \max_{x_i \in X_i} \min_{\omega \in \eta(a_i)} f_i^\omega(\xi(\omega), x_i, x_{-i}^\omega)$$

для интервальной ОМСИ и

$$x_i \in \max_{x_i \in X_i} \sum_{\omega \in \eta(a_i)} p^\omega(a_i) f_i^\omega(\xi(\omega),x_i,x_{-i}^\omega)$$

для вероятностной ОМСИ (в обоих случаях через x_{-i}^ω обозначен набор равновесных действий агентов из множества $\xi(\omega)\backslash\{i\}$).

Содержательный смысл информационного равновесия для вероятностной ОМСИ заключается в том, что агент выбирает такое действие, что математическое ожидание его выигрыша будет максимальным в предположении, что каждый мир (и действия агентов, находящихся в нем), который агент считает возможным, реализуется с вероятностью, которая ему агентом приписывается. В аналогичной форме можно сформулировать и широко известное в области теории игр равновесие Нэша: такая комбинация действий агентов является равновесной по Нэшу, если действие каждого агента является наиболее выгодным ему (с точки зрения его функции выигрыша) при фиксированных действиях других агентов. В случае общего знания, сформулированное выше информационное равновесие для вероятностной ОМСИ в точности совпадает с определением равновесия Нэша. Как и в случае с равновесием Нэша, обоснование определения информационного равновесия для вероятностной ОМСИ через наилучшие действия заключается в том, что при одновременном выборе таких действий, никому из агентов не выгодно выбрать другое действие (так как выбранное - уже наилучшее), поэтому такая комбинация действий является равновесной.

Во второй главе также описывается разработанная общая модель, связывающая модели эпистемической логики и модели рефлексии, методы построения структуры информированности для социальных сетей и свойства многоагентной системы специального вида с неполной осведомленностью.

В разделе 2.2 описана модель частичного наблюдения и связанные с ней алгоритмы: алгоритм информационного процесса при частичном наблюдении, алгоритм поиска оптимального управления в модели частичного наблюдения, алгоритм построения обобщенной ОМСИ для модели частичного наблюдения. Также доказаны утверждения: о корректности таблицы наилучших управляющих воздействий, о монотонности множества миров, об оценке сложности структуры информированности, об оценке сложности переборного алгоритма поиска управления.

Модель частичного наблюдения обобщает классическую модель «о трех мудрецах» и «о чумазых детях».

Формальная постановка модели частичного наблюдения выглядит следующим образом. Обозначим $Q = \{1, \ldots, m\}$ — множество бинарных параметров. Для каждого агента заданы наблюдаемые им параметры таким образом, что Q_i — наблюдаемые i-м агентом параметры. Списки наблюдаемых параметров являются общим знанием, в то время как сами значения известны только наблюдающим их агентам и управляющему центру. При этом существуют ограничения: управляющий центр должен построить множество $\{Q_i\}_{i \in N}$, такое, что $\sum_{i \in N} |Q_i| = q$, и сообщение о параметрах, которое исключает из рассмотрения агентами ровно v возможных миров, где q, v - внешние ограничения на возможные сообщения центра.

Общее количество агентов (не только реальных) в соответствующей ОМСИ вычисляется из комбинаторных соображений и равно

$$|A| = \sum_{i \in N} 2^{|Q_i|}.$$

Процесс взаимодействия построен следующим образом:

1. Центр в условиях существующих ограничений снижает, насколько это возможно, количество шагов взаимодействия агентов, после которого все они будут знать точные значения параметров.

2. Агенты на каждом шаге одновременно и независимо сообщают, известно ли им значение всех параметров. Если кому-то из агентов становятся известны все значения, то он, сообщая об этом, тем не менее не раскрывает сами значения параметров. Это соответствует тому, что агент, узнав все значения параметров, совершает действие, которое об этом однозначно свидетельствует, однако по самому действию в общем случае конкретные значения параметров определить нельзя.
3. Взаимодействие завершается, если на каком-то из шагов количество возможных миров ни для какого из агентов не изменяется.

Такая модель обобщает известные модели из классической задачи «о мудрецах и колпаках» (другое название — задача «о чумазых детях»), одновременно с этим добавляя управление.

Утверждение 2.2.1 (о сложности прямого перебора). Сложность прямого перебора для поиска наилучшего управления в худшем случае равна

$$O\left(2^{2^{m^2}+2^m-1}\right).$$

Утверждение 2.2.2. Не существует управления для достижения полной информированности агентами за один шаг, если сообщением управляющего центра удалено менее чем $2^{n-n[m/n]}-1$ возможных миров, где $[x]$ –оператор взятия целой части от x.

Утверждение 2.2.3. Не существует управления, обеспечивающего полную информированность хотя бы одного агента, ни на каком шаге, если сообщением управляющего центра удалено меньше $2^{n-m}-1$ возможных миров.

Утверждение 2.2.4. Управление, достигающее полной информированности агентов на втором шаге удалением одного и более возможных миров, если количество ненулевых элементов в матрице наблюдаемости больше, чем $m = n-1$, существует тогда и только тогда, когда количество удаленных сообщением управляющего центра миров не равно 2 или $n-2$.

Утверждение 2.2.5. Существует управление, которое позволяет достичь полной информированности всех агентов на втором шаге сообщением, удаляющим один или более возможных миров, если количество ненулевых элементов в матрице наблюдаемости не меньше, чем $m = 2(n-1)$.

При решении задачи управляющего центра был обнаружен эффект немонотонности, который был объяснен. Суть эффекта в том, что при некоторых сочетаниях параметров, управляющий центр не может достичь полной информированности, при этом, если потребовать от него удалять другое заданное, но меньшее количество возможных миров, то центр сможет достичь своей цели: полной информированности агентов.

В разделе 2.3 описан метод вычисления элементов структуры информированности для социальных сетей. Метод позволяет описывать информационные процессы в случае, когда требуется построить реалистичную модель поведения агентов и формальную модель их информированности без построения всех допустимых ситуаций (множество которых может быть бесконечно), т.е. позволяет частично решить проблему размерности для подобных задач.

Модель состоит из множества агентов и параметров, с указанием, какой из агентов в какой из моментов времени наблюдает какой из параметров.

Первое важное предположение состоит в том, что если агент наблюдал значение параметра в какой-то момент времени, то этот факт наблюдения является общим знанием для всех агентов, которые тоже наблюдали значение этого же параметра в тот же самый момент времени. Это ярко иллюстрируется моделью комнат: параметрами являются состояния комнат; для того, чтобы узнать состояние комнаты, надо в ней находиться; все, кто находится в комнате видят друг друга.

Вторым предположением является следствие из закона когнитивной инерции, заключающееся в том, что если агент не наблюдал изменения параметра, то он считает, что параметр не изменился; если же агент не видел, что другой агент наблюдал изменение параметра, то, с его точки зрения, другой агент считает, что параметр не изменился.

Формальное описание модели для одного параметра (без ограничения общности) выглядит следующим образом. Обозначим $T = \{1, \ldots, t_{max}\}$ – конечное множество значений времени, $T_i \in T$ – конечное множество моментов времени, в которые агент i наблюдал значение параметра. Пусть $\theta(t)$ – значение параметра в момент времени t. Начальное значение параметра без ограничения общности будем считать равным 0, а также общим знанием. Введем обозначения для информированности агентов о знании других агентов

значения параметра. Выражение

$$B_{i_1} \dots B_{i_k}(\theta = \theta_0)$$

означает, что агент i_1 уверен, что агент i_2 уверен, что... , что агент i_k уверен, что значение параметра θ равно θ_0.

В работе предлагается следующий новый быстрый алгоритм верификации этого выражения. Для определения истинности этого выражения следует использовать следующее соотношение:

$$B_{i_1} \dots B_{i_k}(\theta = \theta_0) = \begin{cases} \text{истина}, & \text{если } \theta_0 = \theta \left(\max \left\{ \bigcap\limits_{j=\overline{1,k}} T_{i_j} \right\} \right), \ \bigcap\limits_{j=\overline{1,k}} T_{i_j} \neq \varnothing, \\ \text{истина}, & \text{если } \theta_0 = 0, \ \bigcap\limits_{j=\overline{1,k}} T_{i_j} = \varnothing, \\ \text{ложь}, & \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$

Максимум достигается в силу конечности пересечения конечных множеств.

Введенная таким образом рефлексия обладает полезными свойствами:

1. $B_i B_j(\theta = \theta_0) \Leftrightarrow B_j B_i(\theta = \theta_0)$,
2. $B_i B_i(\theta = \theta_0) \Leftrightarrow B_i(\theta = \theta_0)$,

и информированность агентов легко вычисляется, так как требует нахождения не более чем k пересечений множеств для выражения с количеством убеждений не более k уникальных агентов. В частности, общее знание любых k агентов требует нахождения не более чем k пересечений множеств.

Построенная модель применима к социальным сетям в том числе при следующих интерпретациях:

1. Параметры – новостные ленты агентов, а наблюдаемость параметров - подписка на новостную ленту, соответствующая дружбе, при этом агентам известны подписки только своих друзей.
2. Параметры – новостные ленты информационных агентств, а наблюдаемость параметров — подписка на новостную ленту, при этом агентам известны все подписчики этих новостных лент.

В разделе 2.4 описана и исследована на примере олигополии Курно модель скрытых коалиций – участники игры принимают решения в собственных интересах (как обычно в некооперативных играх), однако могут, скрытно от

других агентов, договариваться о совместных действиях. В разделе описано построение ОМСИ для произвольного количества агентов, найдены асимптотики, характеризующие ОМСИ при неограниченном возрастании этого количества. Случай трех агентов полностью исследован аналитически, найдено решение игры (равновесие).

Для исследования равновесий была взята олигополия Курно как хорошо изученная в экономике и в то же время имеющая линейно-квадратичную функцию выигрыша агентов при условии квадратичных затрат (именно такой случай был рассмотрен) с линейной функцией наилучшего ответа. Таким образом, для поиска равновесия следует решить обычную систему линейных уравнений специального вида.

В разделе 2.5 описана модель управления представлениями агентов для достижения равновесия с максимальной суммой действий агентов на примере игры Таллока, позволяющая построить управление активной системой и информационными процессами в ней, при котором достигается максимальный объем суммарных усилий агентов.

Для этого взаимодействие агентов было классифицировано по двум основаниям: наличие обмена значимыми сообщениями и готовность к изменению своего мнения. В исследовании приняты следующие формулировки для этих случаев. Для второго и третьего случая было найдено равновесие (для первого случая оно было известно из литературы).

1. Игра с полной информированностью, т.е. реальное состояние природы является общим знанием. Мнения агентов совпадают между собой и с реальностью. Для поиска равновесия следует выписать и решить систему наилучших ответов.
2. Агенты не общаются. Каждый считает, что его мнение является общим знанием. В этом случае для нахождения равновесия следует для каждого агента составить систему наилучших ответов, решить ее (использовав выражения, найденные для игры 1) и объединить специальным образом действия агентов. Так как агенты не общаются, то их готовность к изменению своего мнения не имеет значения для равновесия.
3. Агенты общаются и после взаимодействия приходят к консенсусу. Предполагается, что результат консенсуса описывается моделью

Френча и является линейной взвешенной суммой начальных мнений агентов с весами, равными их авторитету.

4. Агенты общаются, но не меняют своих мнений. В этом случае для нахождения равновесия следует также составить систему наилучших ответов, однако, в отличие от игры 1, для каждого агента следует использовать именно то значение параметра, которое известно всем, и в истинность которого агент верит.

После нахождения равновесий строилось управление равновесиями, которое заключалось в изменении начальных мнений и влиятельности (для игры 3) агентов. Одним из частных результатов было найденное оптимальное соотношение между изменением отношений между агентами и изменением самих мнений агентов.

Третья глава посвящена построению и исследованию моделей и методов для достижения консенсуса в социальной сети при поляризации и ограниченном доверии, модели распространения аргументов в социальной сети организации, описанию разработки технологии использования датчиков умного города и описанию алгоритмов скрытого поиска объекта группой подводных роботов. Анализ применения ОМСИ для этих моделей показал высокую универсальность предлагаемой в работе модели.

В разделе 3.1 описана модель достижения консенсуса в социальной сети при поляризации и связанный с ней алгоритм достижения консенсуса. Также доказаны утверждения: о достаточных условиях на ограничения, о корректности алгоритма.

В частности, предложена модель поляризации на основе механизмов манипулирования заявками при распределении бюджета, позволяющая достичь консенсуса даже при поляризации начальных мнений агентов.

Агенты считают, что решение будет принято менеджером на основе агрегирования их мнений, причем агрегирование будет происходить простым суммированием их мнений с весами.

Агенты стремятся к тому, чтобы агрегированное мнение всех агентов было как можно ближе к их целевому мнению, цели агентов задаются множеством $\{g_i \in R^2\}$, где g_i — цель i-го агента. Агрегирование мнения агентов будет моделироваться вектором вещественных чисел, а под расстоянием понимается обычное евклидово. Пусть w_i — реальное влияние агента i на

агрегированное мнение, тогда обозначим w_{ij} представление j-го агента о влиянии агента i, а функцию агрегированного мнения с точки зрения агента i обозначим h_i.

Обозначим u_i^t представление агента i о своей целевой функции в момент времени t. Отметим, что так как нам важны лишь их стратегии, то какое именно решение примет менеджер и каковы будут значения целевых функций агентов, не представляет интереса в данном исследовании.

В одномерном случае мнение агента i в момент времени (на этапе рассуждений) t равно $x_i^t \in [0,1]$. Если мнение агента задается вектором, то k-й элемент мнения агента i в момент времени t обозначим x_{ik}^t.

Матрица представлений агентов о влиянии мнений агентов на решение менеджера

$$W = (1 - a - b)W_0 + aI + bE,$$

где $E(i,j) = 1$ и

$$I(i,j) = \begin{cases} 1 & \text{, если } i = j \\ 0 & \text{, если } i \neq j \end{cases}.$$

Представление агента i в момент времени t о своей функции полезности будем считать равным

$$u_i^t = H - \mid (h_i(y_i) - g_i) \mid = H - (h_i(y_i) - g_i)^2,$$

где y_i — предсказание агрегированного мнения (и соответственно решения менеджера) агентом i. Если эти предсказания в точности совпадают с наблюдаемым (т.е. агент считает, что другие агенты не изменят своего мнения), то

$$y_i^t = \frac{\sum_{j \in N} w_{ij} s(x_i^t, x_j^t) x_j^t}{\sum_{j \in N} w_{ij} s(x_i^t, x_j^t)}, \quad i \notin u,$$

$$s_i(x_i^t, x_j^t) = \begin{cases} 1 & \text{, если } \mid x_i^t - x_j^t \mid \leq r \\ 0 & \text{, если } \mid x_i^t - x_j^t \mid > r \end{cases},$$

где мнение x может быть скаляром из R, вектором из R^m или функцией $R^m \to R$. Если $r > \max \mid x_i^{t_i} - x_j^{t_j} \mid$, тогда модель совпадает с моделью Де Гроота.

Следующие выражения демонстрируют вычисление наилучшего ответа для зависимости взвешенных средних от времени:

$$u_i^t = H_i - \left(\sum_{k \in N} \frac{\sum_j w_{ij} s(x_i^t, x_j^t)}{\sum_{j \in N} w_{ij} s(x_i^t, x_j^t)} x_k^t - g_i \right)^2,$$

$$\frac{\partial u_i^t}{\partial x_j^t} = \frac{-2w_{ii}}{\sum_{j \in N} w_{ij} s(x_i^t, x_j^t)} \left(\frac{\sum_{j \in N} w_{ij} s(x_i^t, x_j^t)}{\sum_{j \in N} w_{ij} s(x_i^t, x_j^t)} x_j^t - g_i \right) = 0,$$

$$x_i = \frac{\sum_{j \in N} w_{ij} s(x_i^t, x_j^t)}{w_{ii}} \left(g_i - \frac{\sum_{j \in N \neq i} w_{ij} s(x_i^t, x_j^t)}{\sum_{j \in N} w_{ij} s(x_i^t, x_j^t)} x_j^t \right).$$

В общем случае без управления процесс приводит к экспоненциально быстрой поляризации мнений, т.е. расстояние между мнениями агентов начинает экспоненциально быстро расти и, в случае ограничений на мнения, последние размещаются на границе области допустимых значений.

В разделе 3.2 описана модель информационного управления в активной сетевой структуре в случае, когда воздействие центра на агента может либо отсутствовать, либо быть равным одинаковой для всех агентов величине, при этом управляющему центру неизвестны влиятельности агентов внутри группы. Найдены матенматические ожидания и дисперсии наилучшего результата управления, на основе которых определены наилучшие и наухудшие для центра параметры АСС. Было найдено, что в условиях модели справедливы следующие закономерности.

1. Наиболее благоприятной для центра является ситуация, когда влиятельности всех агентов одинаковы.
2. Наименее благоприятной для центра является ситуация, когда все влияние сосредоточено у одного агента.
3. Чем более однородной (в смысле влиятельностей агентов) является сетевая структура, тем более предсказуемыми являются результаты стохастического информационного управления.

Модель может применяться для описания воздействия рекламных плакатов на жителей городских районов, когда требуется выбрать целевые районы по известной частичной информации о жителях района. Модель учитывает сетевые взоимодействия между жителями - жители свободно обмениваются своим

мнением о рекламируемом товаре или услуге, причем неизвестно заранее, кто из жителей с кем общается, и кто к чьему мнению прислушивается.

В разделе 3.3 описана модель достижения консенсуса при ограниченном доверии агентов и связанные с ней алгоритмы: алгоритм управления, алгоритм агрегирования влияния. Также доказаны утверждения: о неприменимости в общем случае, об эффективности алгоритма.

Схема управления заключается в расположении двух мнений управляемых агентов на экстремальных полюсах мнений и постепенном сдвиге их к консенсусу. При некоторых предположениях (в частности, требуется хотя бы небольшое доверие «незнакомцам») оказывается возможным достигнуть консенсуса. Используя идеи управления с прогнозирующими моделями (model predictive control), удалось показать оптимальность построенного управления. Управление было протестировано в численных экспериментах на данных четырех реальных социальных сетей разнообразных организаций.

В разделе 3.4 описана модель снижения ДТП и связанные с ней алгоритмы: алгоритм повышения прозрачности, алгоритм построения ОМСИ, алгоритм тестирования эффективности. Также доказано утверждение о снижении сложности.

В частности, описана технология использования датчиков умного города для реализации модели, позволяющей снизить количество ДТП, а также алгоритм построения ОМСИ на основе модели когнитивной инерции, предложенной в разделе 2.2 для описания состояния транспортной системы и обеспечивающей возможность предсказания поведения водителей.

При наличии детекторов на светофорах, а также других машинах, наличие машин даже за препятствиями становится известным бортовому компьютеру. Так как расположение улиц и их проезжих частей улиц известно, а также известны марки и цвета кузова машин, то изображение машин с их правильной ориентацией и местоположением можно нанести на экран автомобиля поверх изображения препятствия, что и обеспечивает адекватное информирование водителей о местоположении и скорости других транспортных средств.

Разработано программное обеспечение для исследования разработанной модели информационной системы.

В разделе 3.5 описана модель координации автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) при скрытом поиске и связанные с ней алгоритмы: алгоритм встреч, алгоритм каскадов, алгоритм плотной группы, алгоритм регулярного посещения базы, алгоритм выделенного АНПА. Также доказано утверждение о сравнении алгоритмов.

Условия поиска следующие: известно, что на дне в мутной воде находится искомый объект, группе АНПА следует его найти и вернуться на базу. При этом общаться между собой запрещено условиями соблюдения скрытности. Также, собравшись вместе в малом объеме, они представляют из себя легко обнаруживаемую сканерами цель, чего следует избежать. Задача состоит в минимизации времени поиска объекта и возвращения на базу.

Особенностью поиска является именно требование возвращения всех АНПА на базу, поэтому возникает вопрос об оптимальном скрытном способе оповещения осуществляющих поиск АНПА.

Было рассмотрено несколько алгоритмов и разработан программный комплекс для исследования и сравнения их свойств. Несмотря на то, что не было найдено алгоритма с доказанной оптимальностью, был предложен алгоритм, достигающий более высоких целевых показателей по сравнению с другими рассмотренными.

Рассматриваемые алгоритмы, кроме первого, очень чувствительны к точности определения координат. Обычный алгоритм с возвращением на базу устойчив к шуму, если шум не мешает ему возвращаться на базу.

В **заключении** сформулированы основные выводы и результаты диссертационного исследования.

Результаты работы были внедрены в учебном процессе Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ), а также в системе учета рефлексивных эффектов при оценке инновационных проектов в Ассоциации субъектов инновационной деятельности в горной отрасли «Инновационные горные технологии».

Основные результаты и выводы На основании выполненных исследований предложен единый подход к разработке и исследованию моделей информированности, информационных процессов и рефлексивного управления в АСС, заключающийся в общности описания информированности и ее

динамики под влиянием как наблюдения результатов действий, так и управляющих информационных воздействий. На основе предложенного подхода:

1. Разработана модель обобщенной множественной структуры информированности (ОМСИ) и информационного равновесия на ее основе в условиях неполной взаимной информированности агентов о составе системы, и способствующая поддержке принятия решений на различных уровнях управления.
2. Разработан алгоритм построения и трансформации обобщенной множественной структуры информированности.
3. Разработаны прикладные модели информированности и принятия решений в социальных, экомических, технических системах в условиях, которые обеспечивают возможность рефлексивного управления при неполной взаимной информированности агентов о составе АСС.

Публикации автора по теме диссертации

В изданиях из списка ВАК РФ:

1 Федянин Д., Чхартишвили А. Обобщенная множественная структура информированности // Управление большими системами. — 2024. — т. 109, № 3. — С. 6—20.

2 Бурков В., Федянин Д., и др. Модели и структура управления разработкой и внедрением инновационных средств и технологий (на примере железнодорожного транспорта). I. Механизмы отбора приоритетных проектов и распределения ресурсов // Управление большими системами. — 2018. — С. 81—107.

3 Федянин Д., Чхартишвили А. Консенсус в социальной сети со сложными узлами // Управление большими системами. — 2016. — С. 137—150.

4 Федянин Д., Чхартишвили А. Об одной модели информационного управления в социальных сетях // Управление большими системами. — 2010. — С. 265—275.

В журналах, входящих в международную базу цитирования SCOPUS/Web of Science:

5 Fedyanin D. N. Algorithms for coordination of autonomous underwater drones searching for a hidden object when no long-range communication is allowed // Journal of Physics: Conference Series. — 2021. — Vol. 1864. — https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742–6596/1864/1/012045/meta.

6 Fedyanin D. Logic for Chkhartishvili-Novikov Structures of Beliefs // International Journal of Unconventional Computing. — 2020. — Vol. 15, no. 4. — pp. 259–273.

7 Fedyanin D., Vershinin Y. On Distributed Reflexive Complex Mechanisms of Decision-making in a Transportation System of a Smart city // International Journal of Engineering and Technology. — 2018. — Vol. 7, no. 2.28. — pp. 164–167.

8 Fedyanin D., Chkhartishvili A. A model of informational control in active network structures in case of an incomplete awareness of the principal // Automation and Remote control. — 2013. — № 74. — P. 2155—2162.

В материалах конференций, входящих в международную базу цитирования SCOPUS/Web of Science:

9 Fedyanin D. N. Informational structures for hidden coalition equilibria // Prodeedings of 8th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT). — 2022. — pp. 712–717.

10 Fedyanin D. N. On control for reaching a consensus in multiagent systems with bounded opinion updates // Proceedings of the 14th International Conference "Management of Large-Scale System Development" (MLSD). — 2021. — https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9600191.

11 Fedyanin D. N. Reaching a consensus in polarized social networks // Proceedings of the 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). — 2021. — https://ieeexplore.ieee.org/document/9632168.

12 Fedyanin D. N. Ordering in games with reduced memory and planning horizon of players // Trends in Mathematics. — 2021. — pp. 99–118.

13 Fedyanin D. N. Predictions of Additional Efforts Caused by Social Interactions Among Employers // Proceedings of the 2nd International

Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). — 2020. — pp.184–189.

14 Fedyanin D. Models of Optimal Control in Tullock Rent-Seeking Game // Contributions to Game Theory and Management. — 2020. — Vol. 13. — pp. 132–141.

15 Fedyanin D. N. Model of Management of Artificial Social Network with Large Amount of Reflective Agents // Proceedings of the 11th International Conference "Management of Large-Scale System Development" (MLSD). — 2018. — https://ieeexplore.ieee.org/document/8551944/s.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

16 Федянин Д. Н. Построение множественных структур информирован ности: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023618689 РФ; Зарег. 27.04.2023.

17 Федянин Д. Н., Русяева Е. Ю., Ахобадзе Г. Н. Лингвистический анализатор текста: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023668307 РФ; Зарег. 25.08.2023.

Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве, заключается в следующем: в статье [1] предложена ключевая идея и примеры, в статьях [3, 4, 8] автором доказаны математические утверждения, при работе над статьей [2] автором разработан программный комплекс для оценки инновационных проектов, в статье [7] автором предложена идея и разработан программный комплекс.

Научное издание

Федянин Денис Николаевич

Модели информационных процессов в рефлексивном управлении активными сетевыми структурами

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 10.03.2025. Формат 60×90/16.
Усл. печ. л. 1,5. Уч.-изд. л. 1,0.
Тираж 100 экз. Заказ № ___.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова
Российской академии наук
117997,
ул. Профсоюзная, д. 65
Россия, Москва
http://www.ipu.ru