

**Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова
Российской академии наук**

**Модели и методы обеспечения надежности и
безопасности авиационных систем при управлении
в условиях критических сочетаний событий**

**Докладчик:
Филимонюк Леонид Юрьевич
ведущий научный сотрудник Лаборатории № 27**

Москва - 2021

Актуальность исследования



Около 24 тысяч воздушных судов.

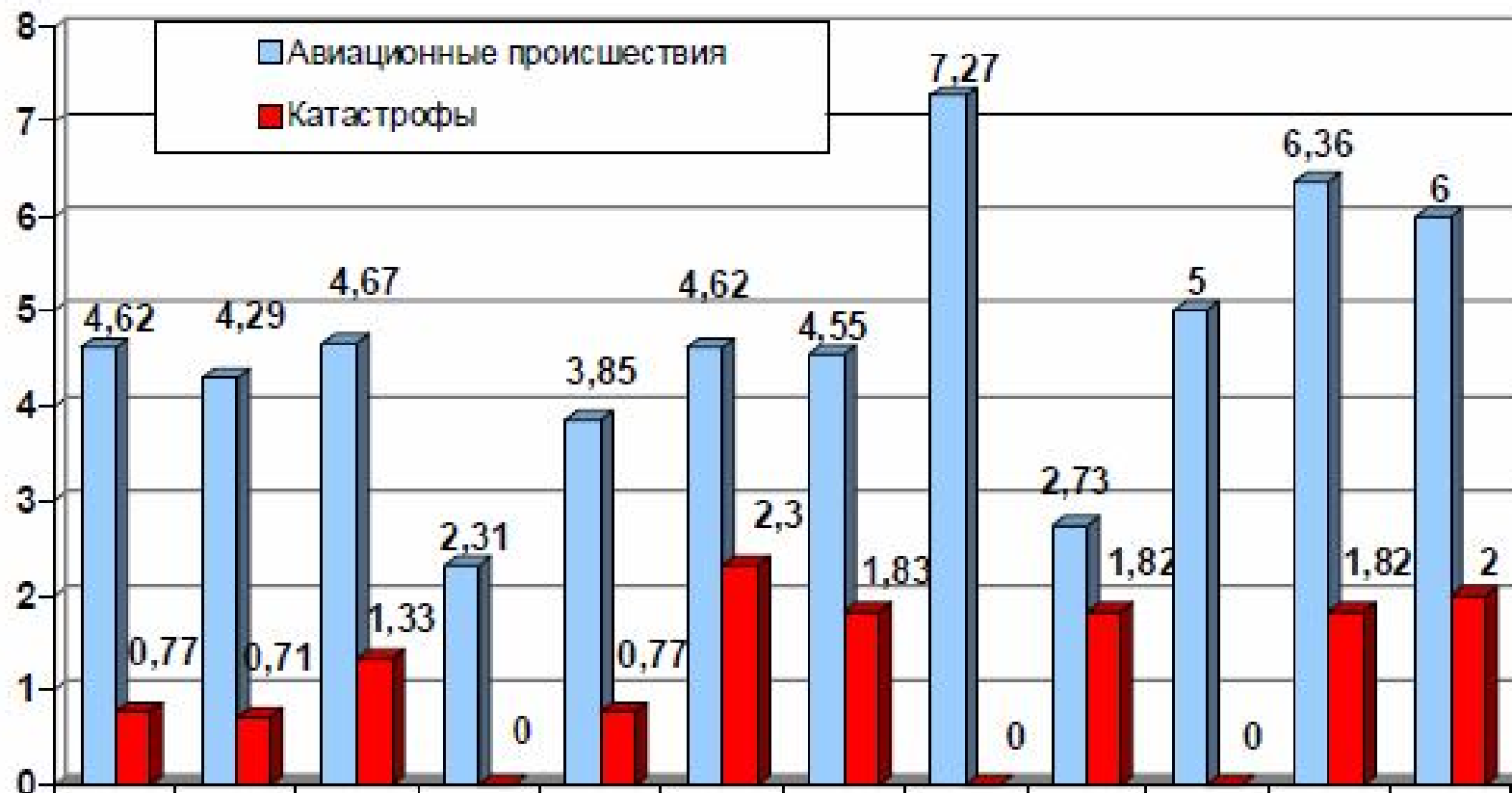
56,6 млн. человек работают в авиационной отрасли.

Более 2 трлн. долл. вклада в мировой валовый внутренний продукт.

Более 2,5 млрд. пассажиров ежегодно.

5,5 трлн. долл. - общая стоимость перевозимых полезных грузов ежегодно.

Динамика количества летных происшествий и катастроф в гражданской авиации на 10^6 часов полета



Согласно прогнозам объемы воздушных перевозок в ближайшие 15 лет удвоятся, поэтому необходимо **разработать методологию, позволяющую** осуществлять упреждающий подход к устранению существующих и возникающих *нарушений безопасности в особых ситуациях полета*, а также анализировать и предотвращать те из них которые имели место в реальности.

Подходы к определению авиационной безопасности

Авиационная безопасность –

- близкий к нулю уровень авиационных происшествий или серьезных инцидентов;
- отсутствие опасности или риска; т. е. факторов и их сочетаний, которые нарушают безопасность и могут причинить потери;

отношение экипажей и наземного персонала к небезопасным действиям и условиям (отражает “безопасную” корпоративную культуру, т.е. пилот не будет нарушать инструкции, т.к. наказание серьезнее выгоды от нарушения);

- степень, до которой присущий авиации риск является “приемлемым”;

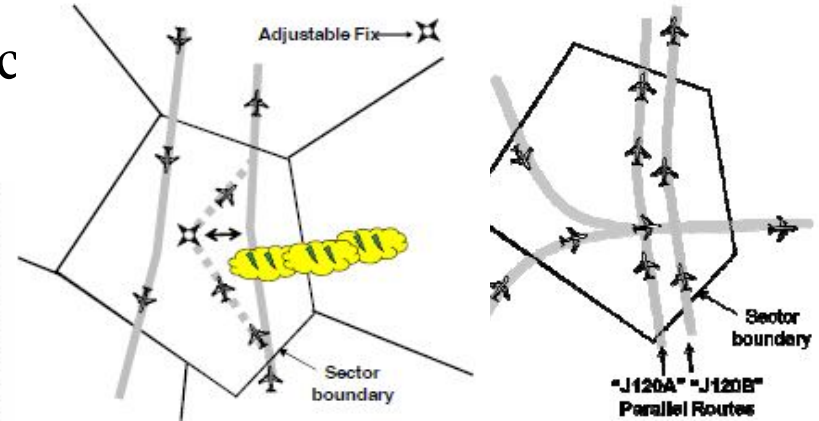
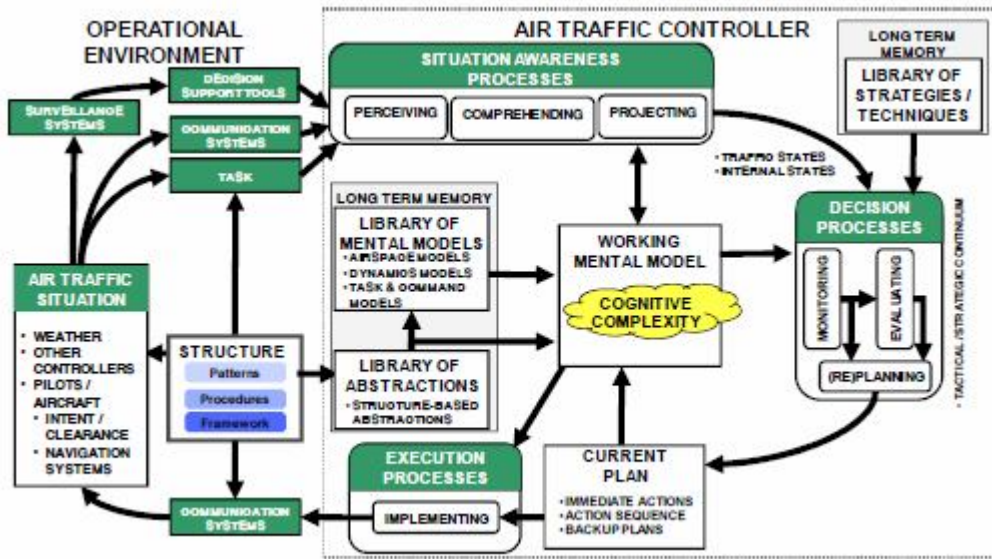
- процесс выявления источников опасности и контроля факторов риска;

- недопущение или минимизация потерь в результате авиапроисшествий (человеческих жертвы, а также нанесение ущерба имуществу и окружающей среде)



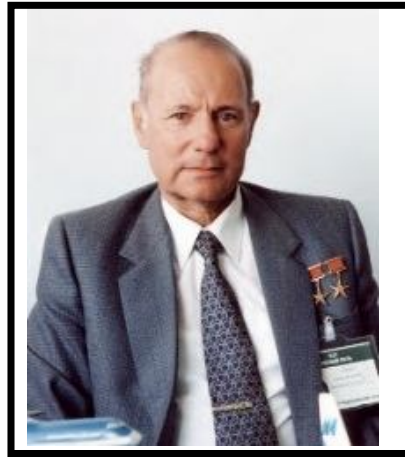
Массачусетский технологический институт

Jonathan M. Histon and R. John Hansman
Department of Aeronautics and Astronautics
Massachusetts Institute of Technology



Исследование не предусматривает детальную модель аварии или теорию о том, как множество функций и объектов в сложной системе взаимодействуют и зависят друг от друга. Это ограничивает его применение в качестве инструмента выработки управляющих воздействий.

Модель надежности и безопасности ОАО «Ил»



Генеральный
Конструктор ОКБ «Ильюшин»,
с 1970 по 2005 г.,
академик РАН Г.В. Новожилов

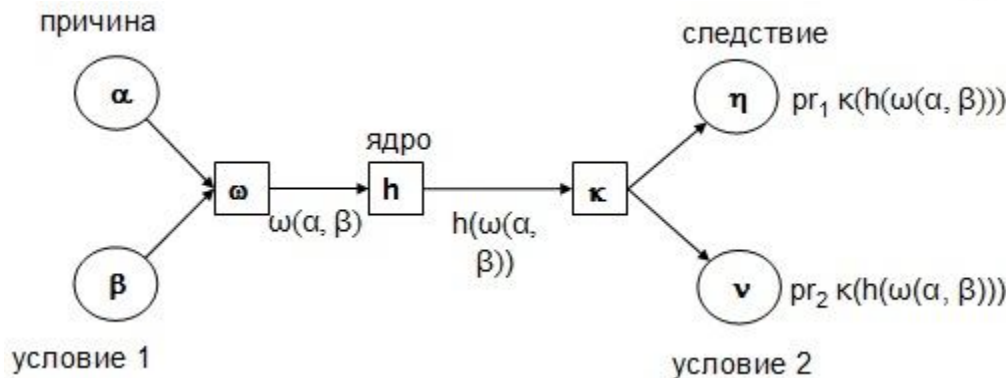
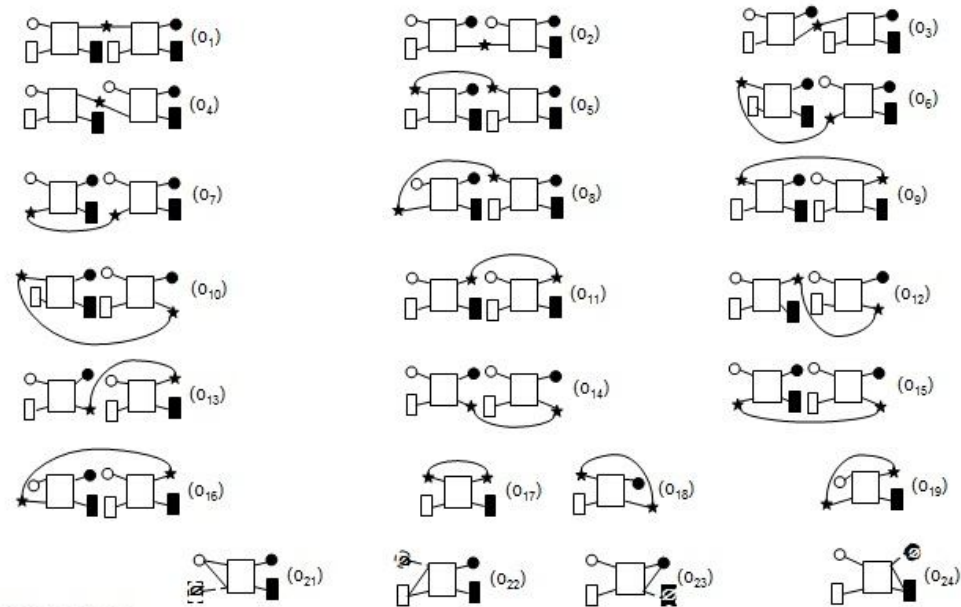
Модель надежности и безопасности (МНИБ) для Ил-76, Ил-86, Ил-96 Программный продукт «ФАНАТ» является программно-технологическим комплексом (ПТК), предназначенным для проведения анализа надежности и безопасности функционирования **технического** объекта (воздушного судна). Инструментом проведения анализа надежности и безопасности является анализ функциональных отказов, а методической основой - методы приведения и достраивания событий.

Модели причинно-следственных связей событий ИПТМУ РАН

Разработана методология описания функционирования сложных систем с помощью комплексов причинно-следственных связей событий.
(чл.корр. РАН Резчиков А.Ф., проф. Твердохлебов В.А.)



Структура операций над звеньями, компонентами и комплексами причинно-следственных связей



Модель для анализа надежности и эффективности многоуровневых технической систем

Под руководством д.т.н. Викторовой В.С. развивается новое научное направление – исследование контролепригодности авиационных систем совместно с корпорацией «ИРКУТ», ФГУП «ГосНИИАС». «Разработка моделей, методов, алгоритмического обеспечения автоматизированного анализа контролепригодности самолётов семейства МС-21», «Исследование моделей контролепригодности и технического обслуживания бортового авиационного оборудования и влияния указанных факторов на показатели надёжности».

Основные направления исследований:

- Вычисление показателей надежности на многоуровневых марковских моделях.
- Анализ многоуровневых систем на логико-вероятностных моделях.
- Разработка программного обеспечения анализа надежности и производительности многофазных систем.



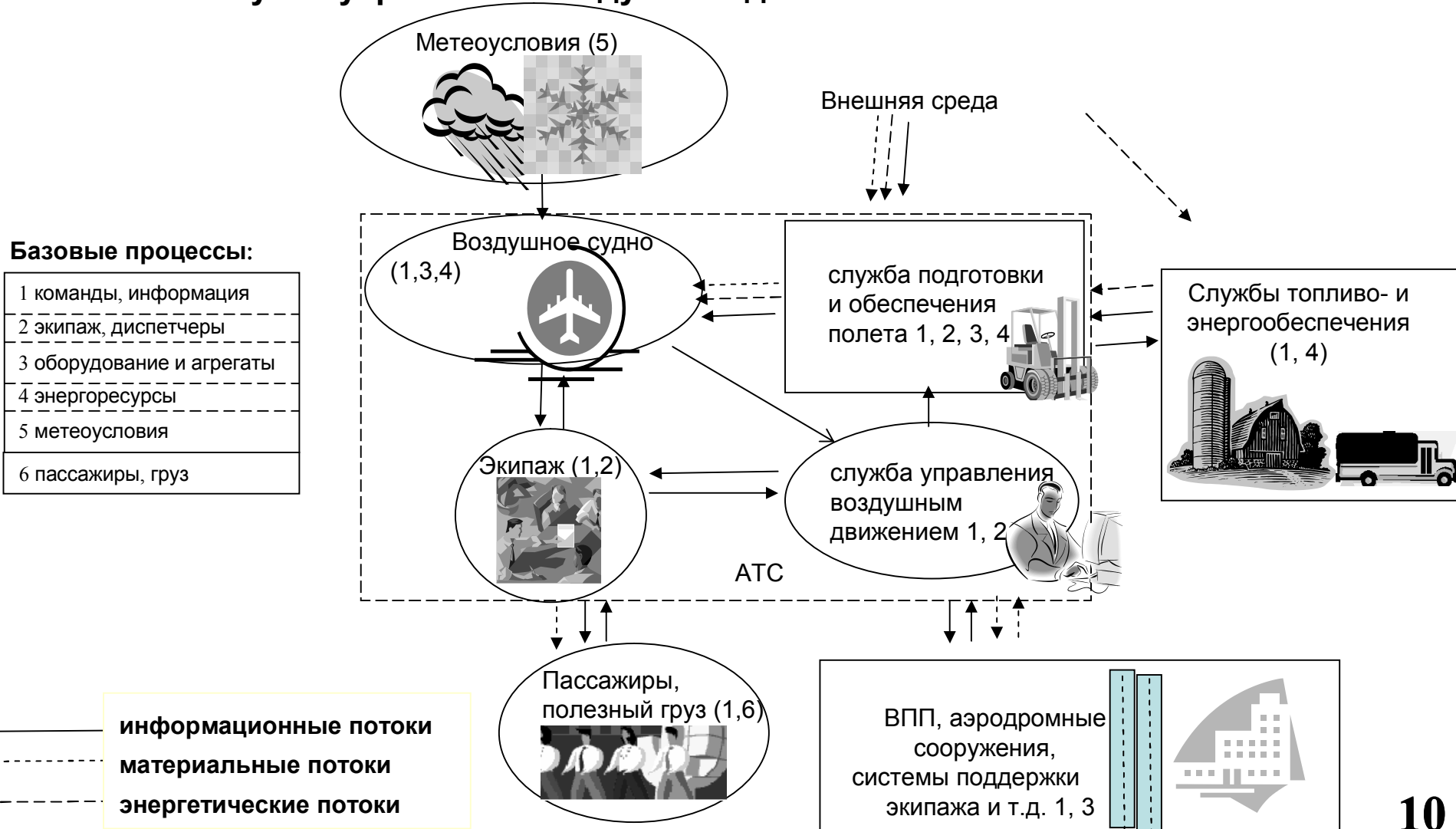
Концепция безопасности авиационно-транспортных систем



Авиационно-транспортная система

Авиационно-транспортная система состоит из взаимосвязанных компонентов:

- воздушное судно (ВС),
- экипаж,
- служба подготовки и обеспечения полета,
- служба управления воздушным движением.



Аварии и катастрофы в авиационных транспортных системах, вызванные критическими сочетаниями событий



01.07.2002 - Ту-154 и В-757, Германия



09.07.2006 - Airbus-310, Иркутск



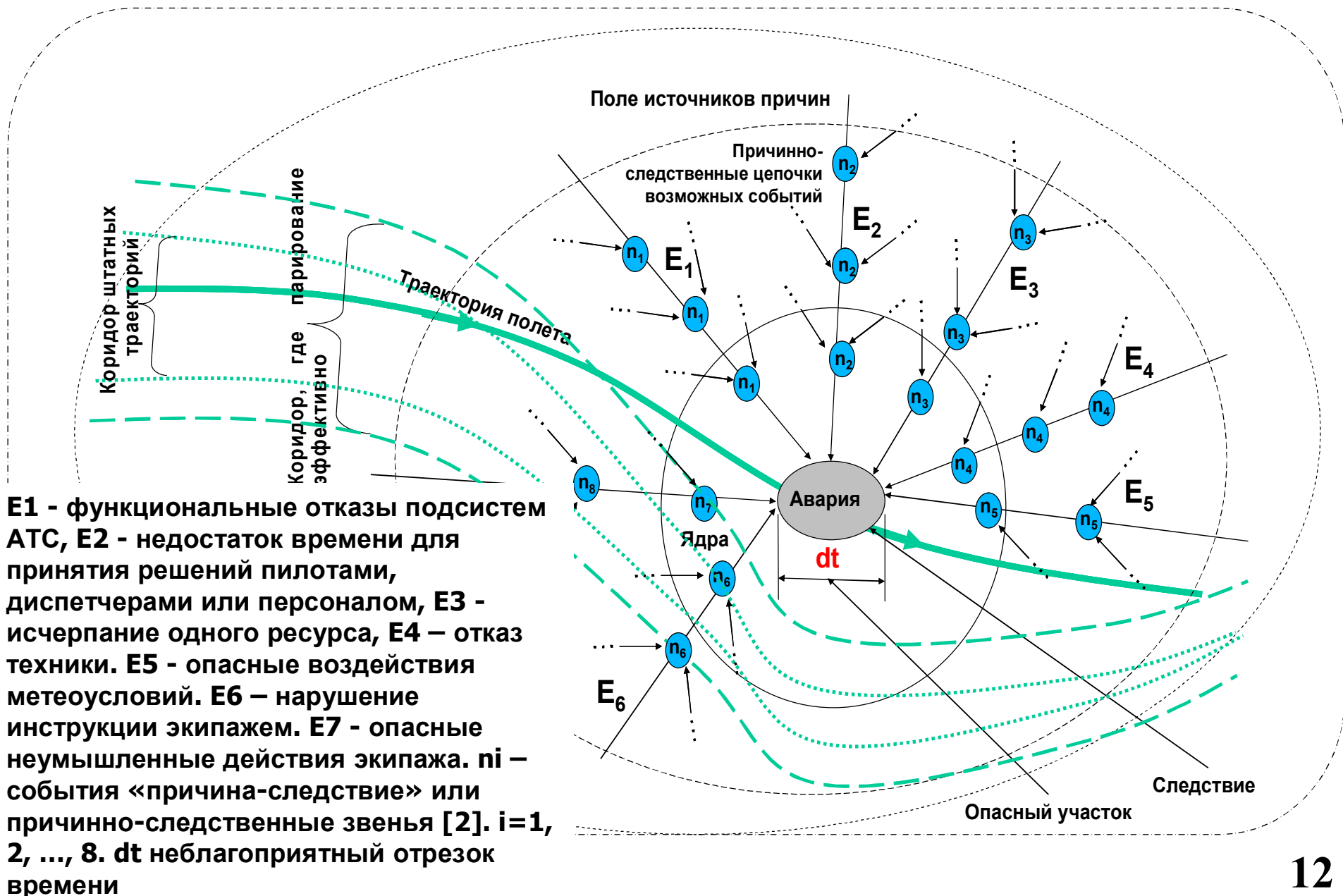
20.10.2014 - Falcon - 50, Внуково



01.06.2009 - Airbus-320, Атлантика

24.03.2015 - Airbus-320, Франция

Критические сочетания событий в авиационной транспортной системе



Классификация критических сочетаний событий в АТС

К1 - по времени возникновения t_0 относительно момента аварии.

К2 - по продолжительности временного промежутка сочетания событий δt .

К3 - по интенсивности проявления рассматриваемого сочетания событий.

К4 - по этапу развития отказа технической части системы: ситуация, возникшая вследствие данного стечения, может иметь вид отказа, инцидента, аварии, катастрофы.

К5 - по подсистемам: P^*1 – персонал управления АТС; P^*2 – программно-аппаратный комплекс управления; P^*3 – техническая часть АТС; P^*4 - энергетика; P^*5 – грузы и пассажиры; P^*6 – окружающая среда.

К6 - по составу и количеству разнородных процессов, участвующих в сочетании событий: $P1$ - процессы действий персонала АТС; $P2$ - командно-информационные, управляющие процессы; $P3$ - процессы функционирования оборудования АТС; $P4$ - процессы топливо- и энергообеспечения; $P5$ - процессы действий пассажиров, перемещений грузов и т.д.; $P6$ - взаимодействий с внешней средой.

К7 - по объектам и элементам в соответствии с их иерархическим представлением, определяемым технической документацией.

К8 - по видам ошибок экипажей, диспетчеров: организационные ошибки (халатность, недостаток руководства операторами, источников информации); ошибки при взаимодействии человека с технической подсистемой в соответствии с классификацией специалистов в области психологии и физиологии, преднамеренные и непреднамеренные.

К9 - по влиянию на достижение цели функционирования: сильное, слабое, способствующие достижению цели, предотвращающие аварийные ситуации.

К10 - по отношению к АТС: воздействия сочетания событий окружающей среды, сочетания отказов подсистем АТС и опасных воздействий окружающей среды, внутренних факторов.

К11 – по степени опасности сочетания отказов: сочетания некритичных, сочетания критичных, сочетания критичных и некритичных отказов.

К12 – по сложности предотвращения и парирования на текущий момент.

К13 – по количеству элементарных событий в сочетании.

Классификация критических сочетаний событий в авиационной транспортной системе

Подсистемы АТС	Классы сочетаний				
	K_1	K_2	K_3	...	K_m
P_1^*	$P_1 \times K_1$	$P_1 \times K_2$	$P_1 \times K_3$	...	$P_1 \times K_m$
P_2^*	$P_2 \times K_1$	$P_2 \times K_2$	$P_2 \times K_3$	...	$P_2 \times K_m$
P_3^*	$P_3 \times K_1$	$P_3 \times K_2$	$P_3 \times K_3$	...	$P_3 \times K_m$
P_4^*	$P_4 \times K_1$	$P_4 \times K_2$	$P_4 \times K_3$	...	$P_4 \times K_m$
P_5^*	$P_5 \times K_1$	$P_5 \times K_2$	$P_5 \times K_3$	...	$P_5 \times K_m$
P_6^*	$P_6 \times K_1$	$P_6 \times K_2$	$P_6 \times K_3$	...	$P_6 \times K_m$

...

Общая постановка задачи обеспечения безопасности авиационных транспортных систем

Требуется разработать алгоритм синтеза вектора управляющих

воздействий $u(t) \in \{U(t)\}$, позволяющих при любых допустимых состояниях окружающей среды $x(t) \in \{X(t)\}$ достигнуть максимума критерия безопасности функционирования авиационно-транспортной системы

$$F = (F_1, F_2, \dots, F_m) \rightarrow \max$$

$$F_1 = \int_{t_H}^{t_K} F_1(x(t), u(t), x'(t), u'(t)) dt$$

$$\dots$$

$$F_m = \int_{t_H}^{t_K} F_m(x(t), u(t), x'(t), u'(t)) dt$$

при ограничениях:

$$R_i(x(t), u(t), x'(t), u'(t)) \geq 0, \quad i = \overline{1, n_1}$$

$$R_i(x(t), u(t), x'(t), u'(t)) \geq 0, \quad i = \overline{1, n_1 + 1, n_2}$$

граничных условиях:

$$W_i^{(t_H)}(x(t), u(t), x'(t), u'(t)) = 0, \quad i = \overline{n_2 + 1, n_3}$$

$$W_i^{(t_K)}(x(t), u(t), x'(t), u'(t)) = 0, \quad i = \overline{n_2 + 1, n_3}$$

$$C_i f = \sum_{i=1}^m (1 - P_i(\lambda_1(t), \lambda_2(t), \lambda_3(t), \dots, \lambda_k(t), \mu_1(t), \mu_2(t), \mu_3(t), \dots, \mu_k(t), \vec{x}(t), t)) \rightarrow \max$$

Основные этапы решения задачи:

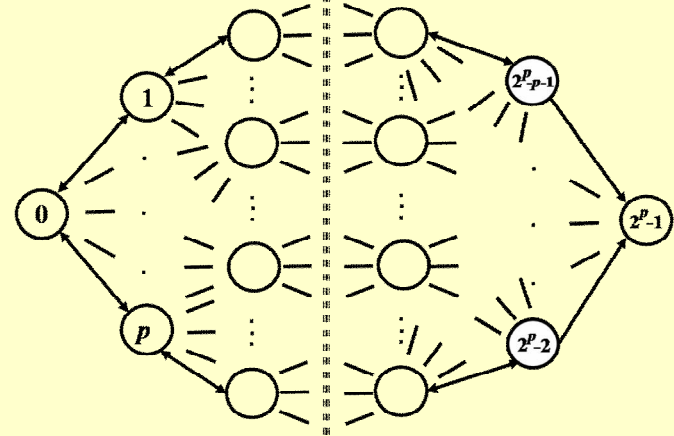
- определить список событий в процессе функционирования авиационных транспортных систем;
- установить для каждого события причинно-следственные связи с другими событиями;
- построить деревья событий, в том числе приводящие к авариям и катастрофам;
- построить на основе деревьев событий модели критических сочетаний событий в виде графов и провести их классификацию;
- для каждого класса рассматриваемых критических сочетаний событий построить математические модели в виде систем дифференциальных уравнений;
- получить решения указанных систем уравнений для определения вероятностей возникновения критических сочетаний событий.

Система дифференциальных уравнений

для определения вероятности возникновения критических сочетаний
событий

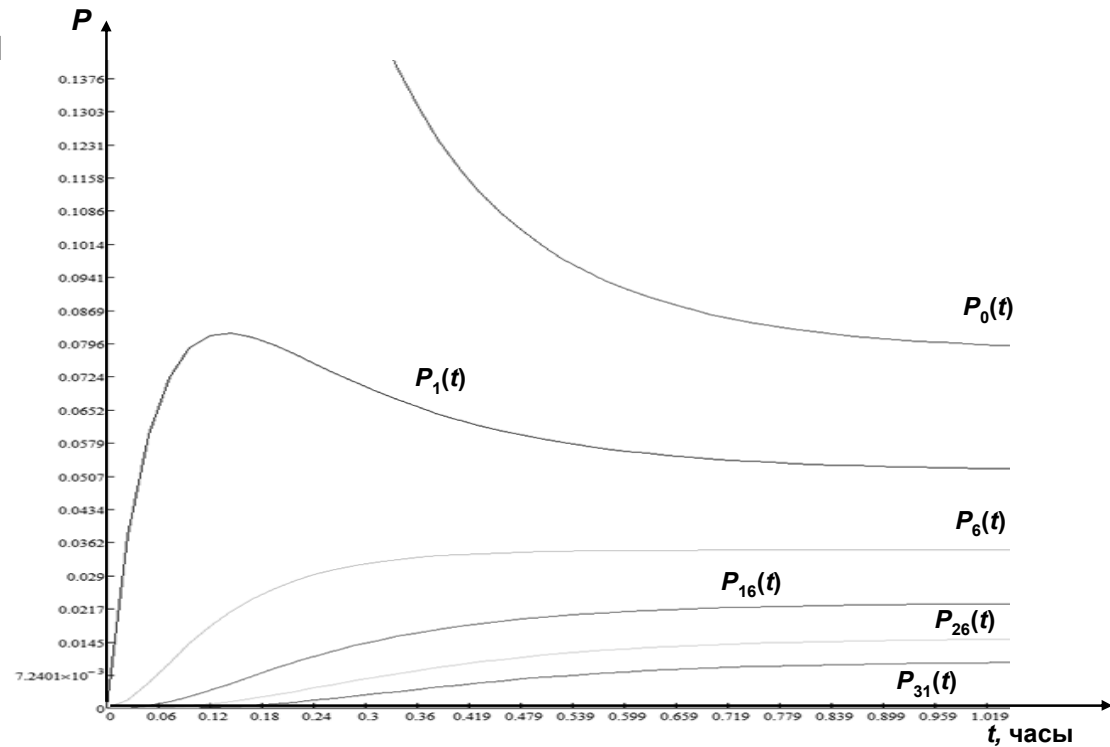
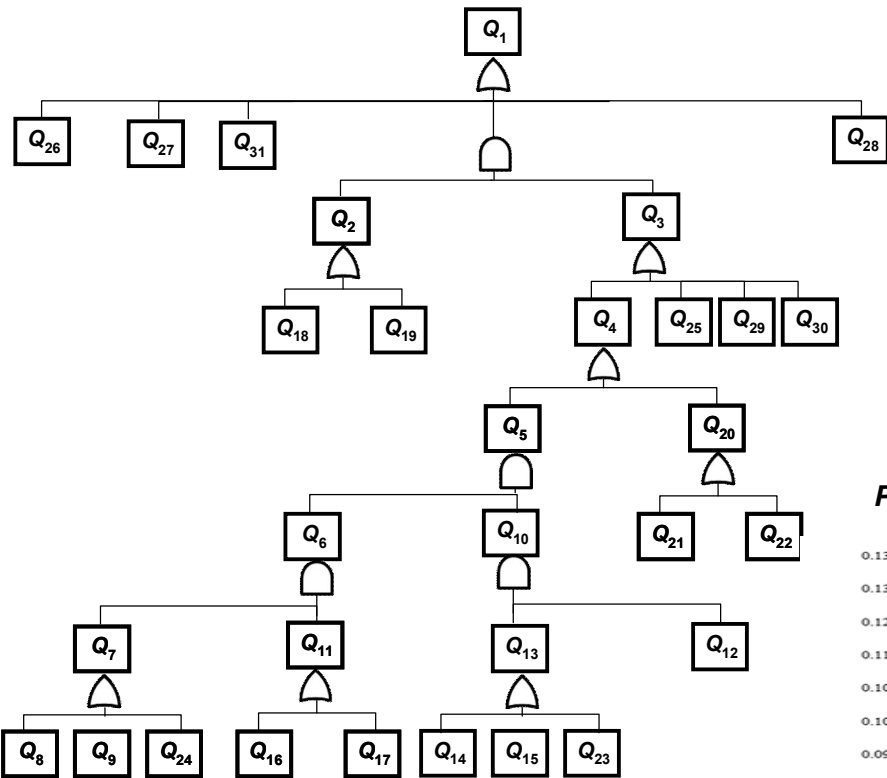
$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dP_0(t)}{dt} &= \sum_{j=1}^p (\mu_j P_j(t) - \lambda_j P_0(t)) \\ &\quad \dots \\ \frac{dP_i(t)}{dt} &= \sum_{j=0}^{2^p-1} \pi_{i,j}^+ P_j(t) - P_i(t) \pi_i^- \\ &\quad \dots \\ \frac{dP_{2^k-1}(t)}{dt} &= \sum_{j=1}^p \lambda_j P_{2^k-k+j-2}(t) \end{aligned} \right.$$

$$\frac{dP_v(t)}{dt} = \sum_{w=0}^{2^n-1} \pi_{v,w}^+ P_w(t) - P_v(t) \pi_v^-$$



где $\pi_{v,w}^+ = \lambda$, если дуга графа G состояний, помеченная значением интенсивности возникновения отказов λ , входит из состояния w в v , $\pi_{v,w}^+ = \mu$, если дуга, помеченная значением интенсивности восстановления работоспособности μ , входит из состояния w в v , $\pi_{v,w}^+ = 0$, если дуги из состояния w в v в графе нет, π_v^- — сумма пометок всех дуг, выходящих из дуги v в другие вершины графа, $\lambda \in \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\}$, $\mu \in \{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n\}$, $v, w \in \{0, \dots, 2^n - 1\}$.

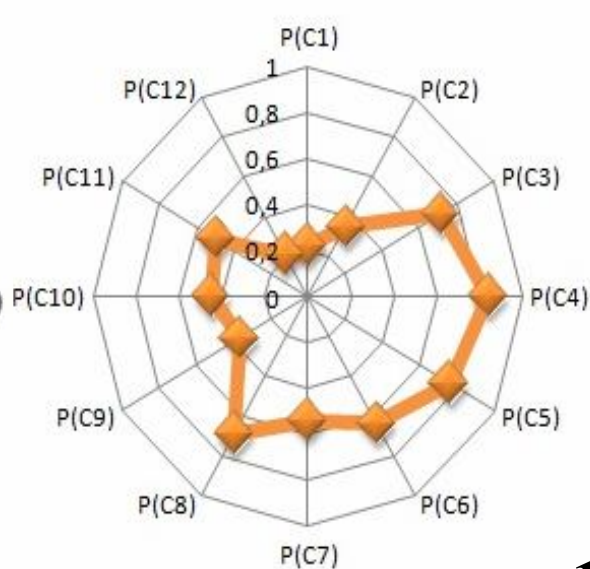
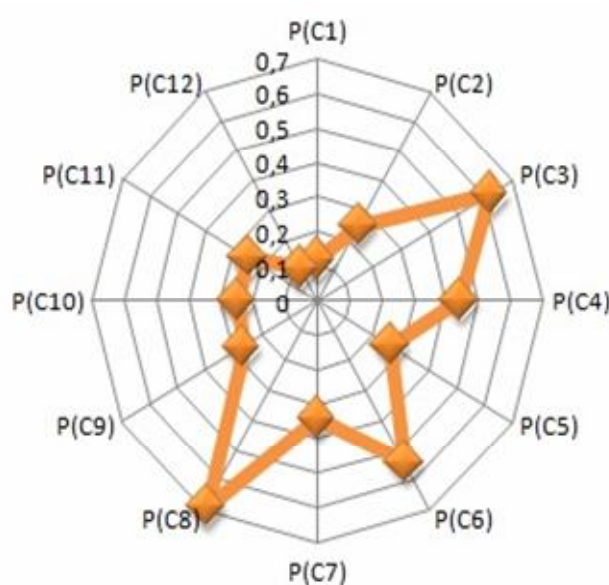
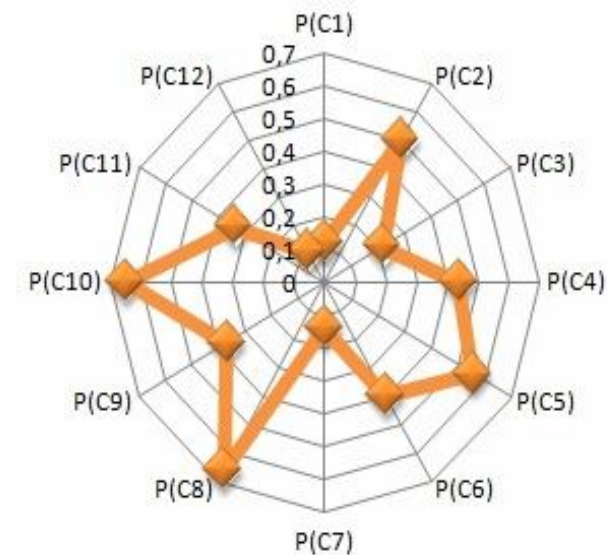
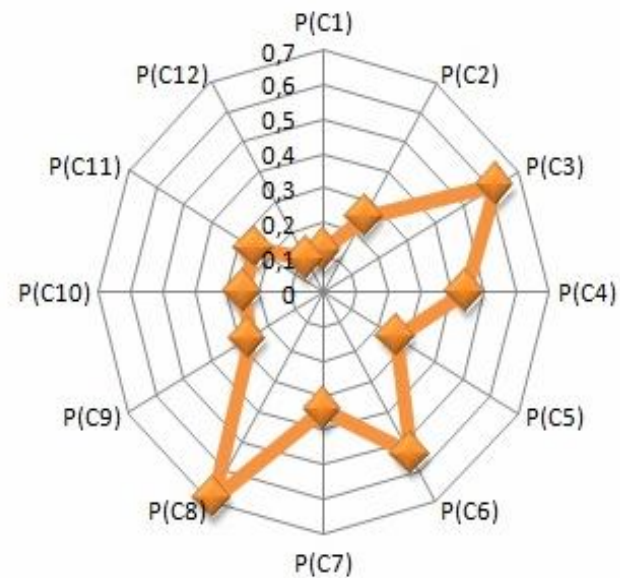
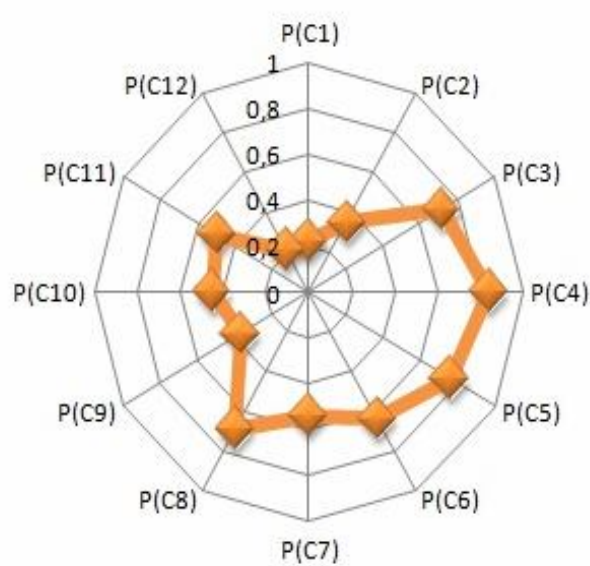
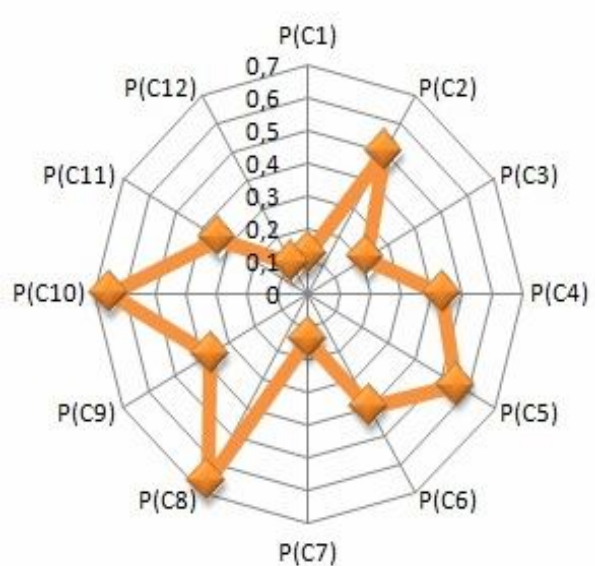
Пример решения задачи



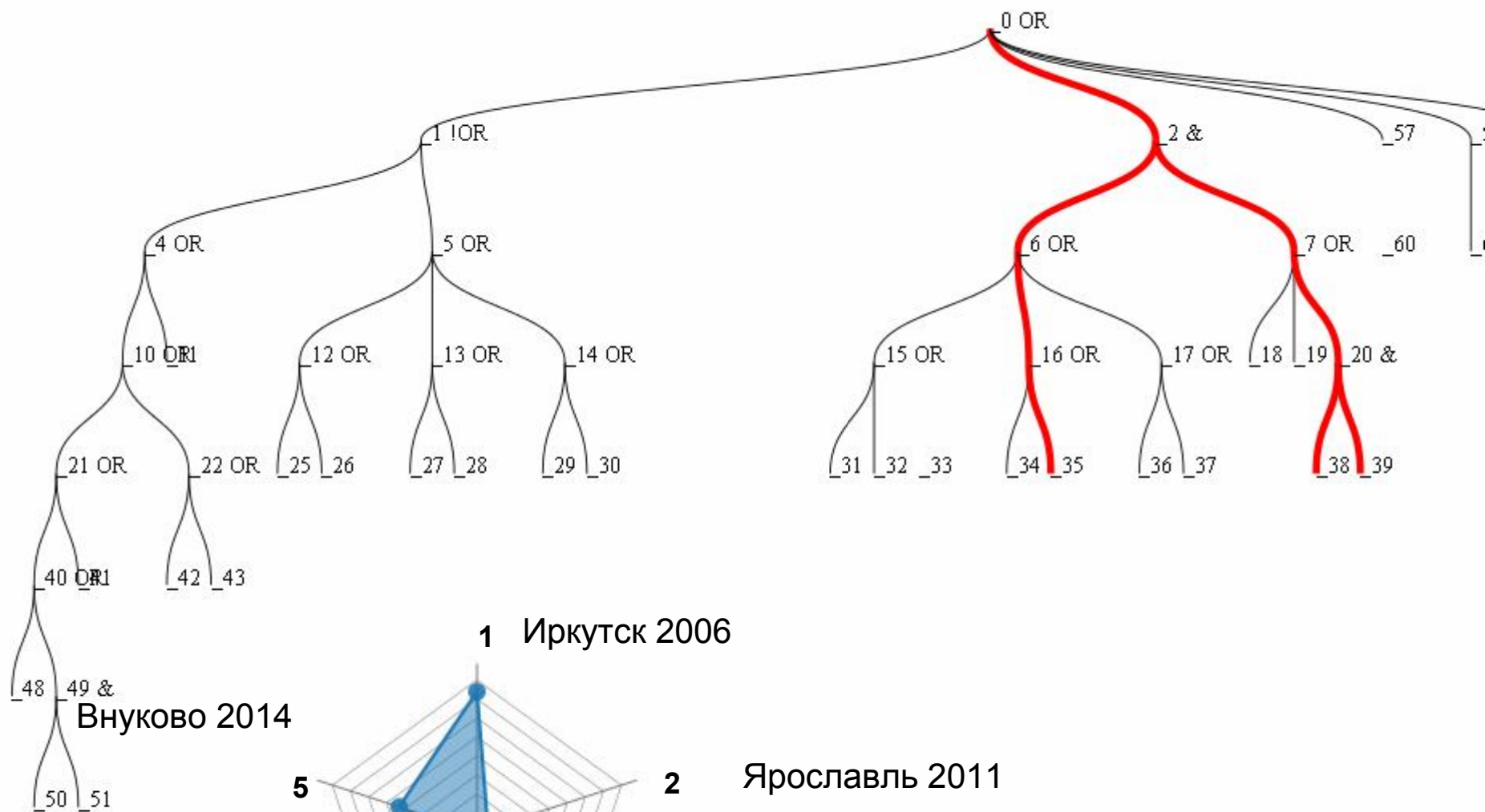
Критическое сочетание событий:

- утечка из топливного трубопровода;
- перегрев поверхностей мотогондолы;
- отказ пожарного крана двигателя;
- ошибка пилота при отключении исправного двигателя;
- ошибка пилота при отсутствии отключения неисправного двигателя.

Полярные диаграммы для поддержки принятия решений при управлении авиационными транспортными системами



Динамическое причинно-следственное дерево событий и его минимальные сечения



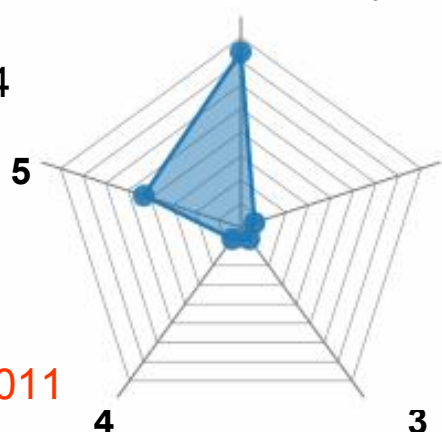
1 Иркутск 2006

Внуково 2014

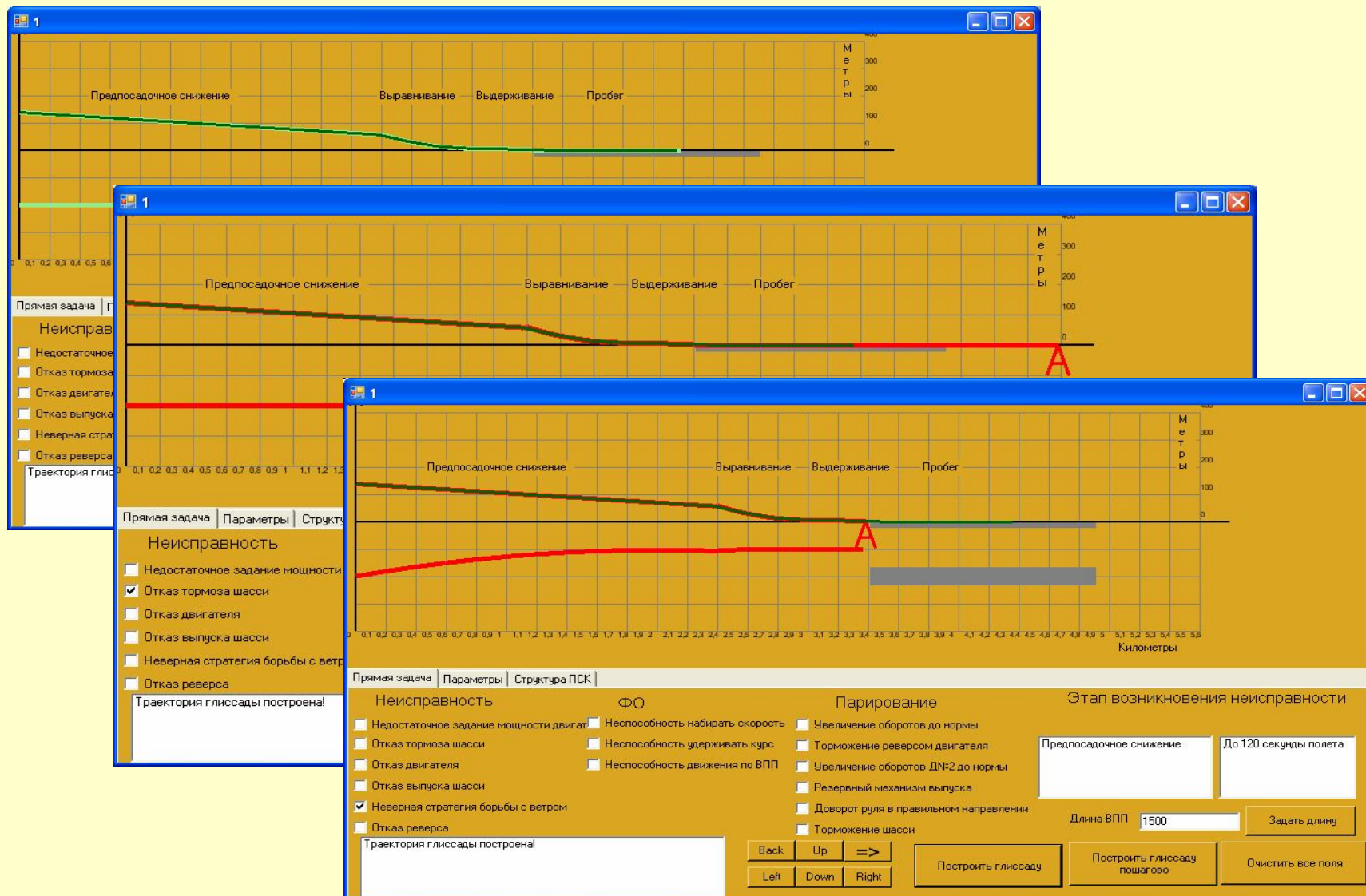
2 Ярославль 2011

Петрозаводск 2011

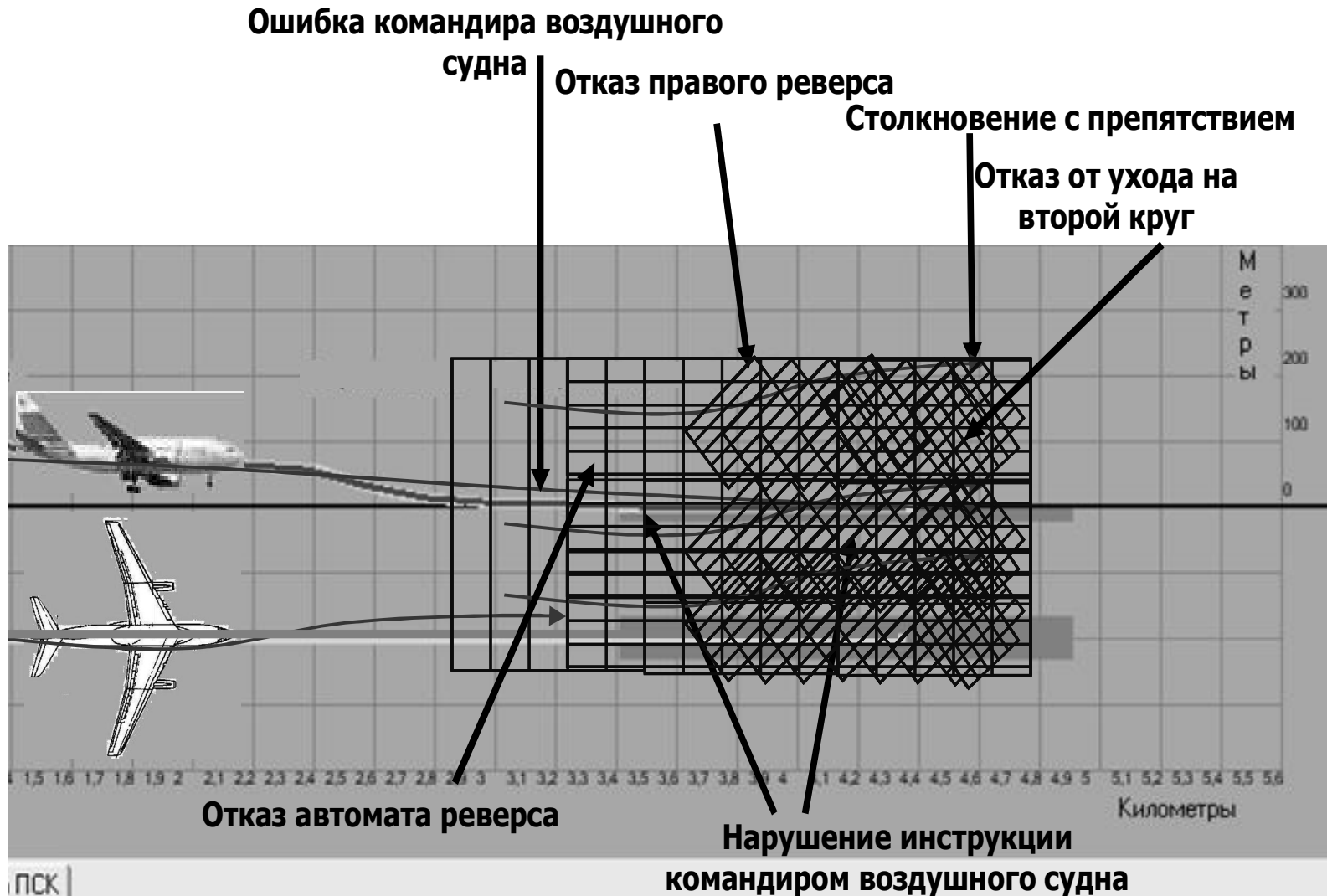
3 Атлантика 2009



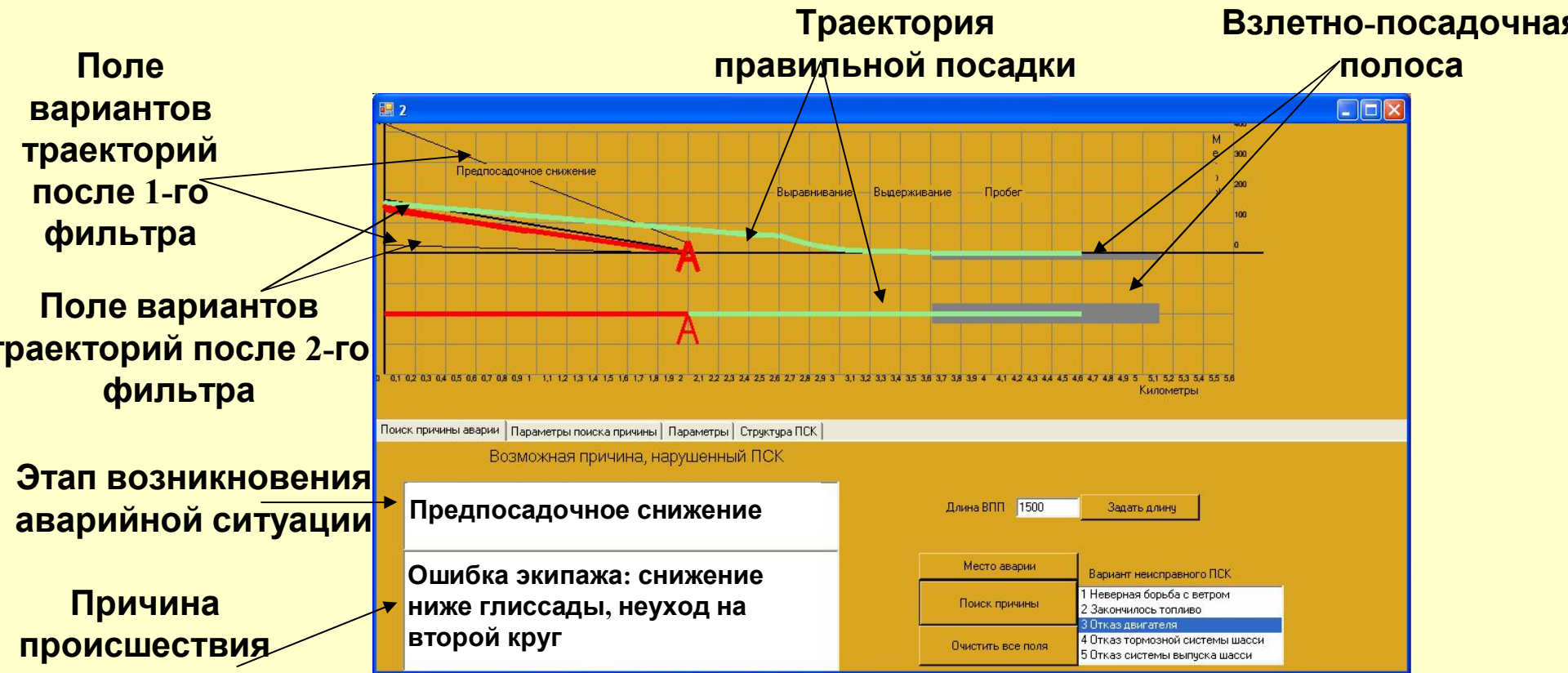
Программно-информационный комплекс для решения задачи управления для обеспечения безопасности при посадке ВС



Программно-информационный комплекс для определения критических сочетаний событий при посадке



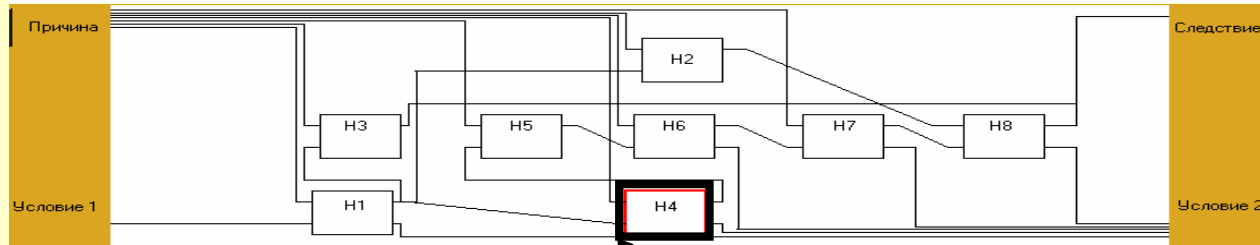
Программно-информационный комплекс для решения задачи поиска причин происшествий при посадке



Этап возникновения аварийной ситуации

Причина происшествия

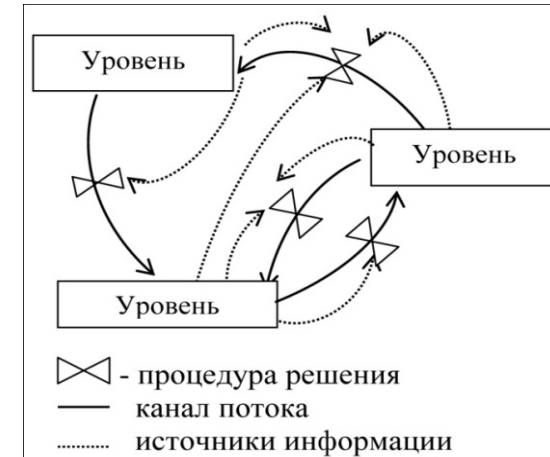
Причинно-следственное звено нарушенного функционирования



Прогнозирование основных характеристик безопасности авиационных транспортных систем

Системно-динамический подход.

Постановка задачи. Разработать комплекс математических моделей, позволяющих на различных интервалах времени определить прогнозные значения основных показателей АТС



Модель нелинейной системы

$$\frac{dI_j}{dt} = F_j(I_1, \dots, I_n), j = 1, \dots, n.$$

Разложение в ряд

$$\frac{dI_j}{dt} = \alpha_{j,0} + \alpha_{j,1}I_1 + \dots + \alpha_{j,n}I_n, j = 1, \dots, n.$$

Зависимость темпов от уровней

$$\alpha_{i,k}(I_1, \dots, I_n) = \alpha_{i,k} \omega_{i,k,1}(I_1) \dots \omega_{i,k,n}(I_n), k = 1, \dots, n.$$

Модель системной динамики

$$\frac{dI_j}{dt} = \alpha_{j,0} + \sum_{k=1}^n \alpha_{j,k} \prod_{l=1}^n \omega_{j,k,l}(I_l) I_k, j = 1, \dots, n.$$

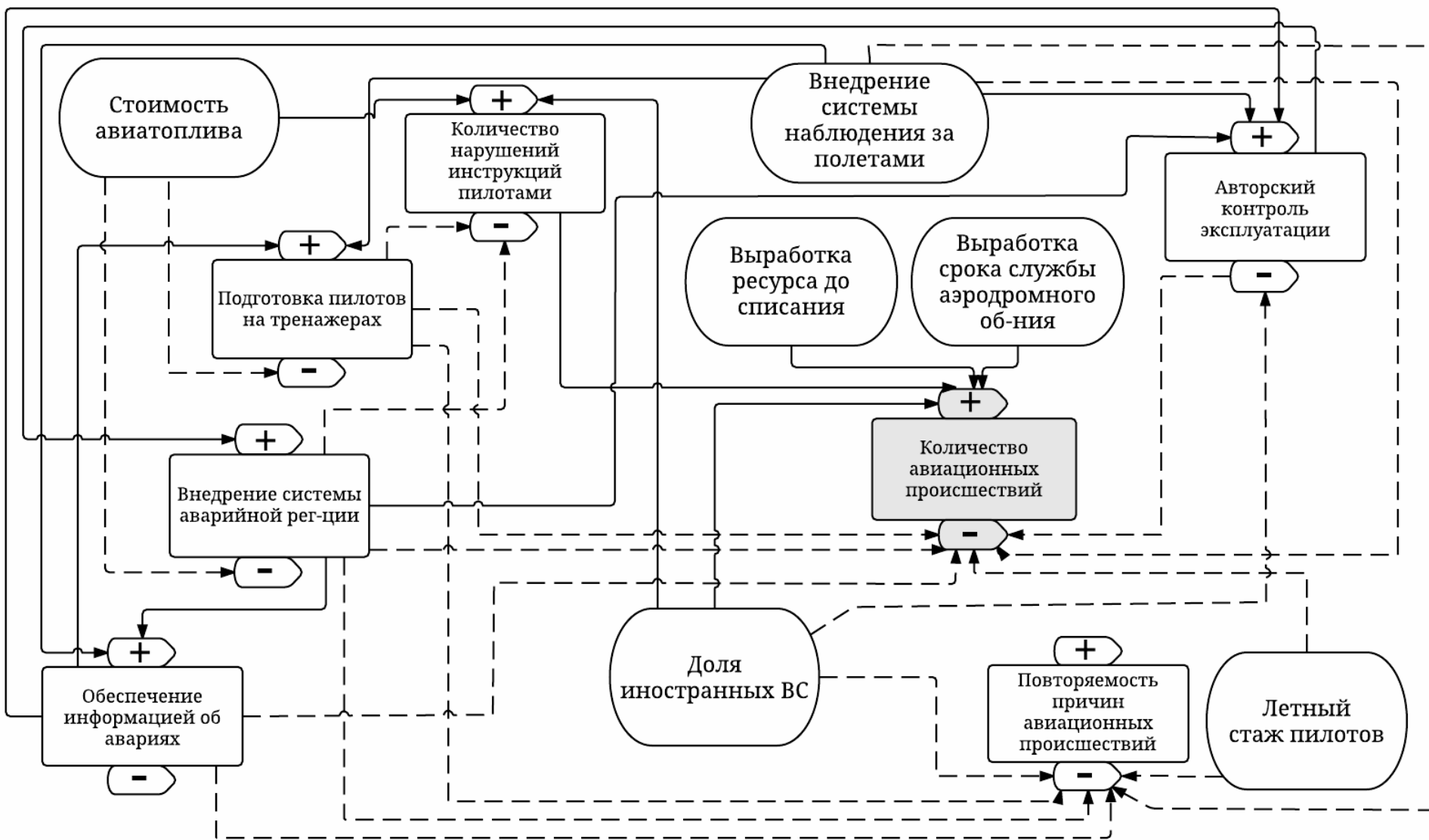
Моделирование динамики основных характеристик безопасности авиационных транспортных систем

Требуется определить значения характеристик X_1, X_2, \dots, X_m исходя из решения системы нелинейных дифференциальных уравнений вида

$$\frac{dX_i}{dt} = S_i^+ \Pi_i^+ - S_i^- \Pi_i^-$$

где S_i^+ и Π_i^+ – соответственно сумма внешних факторов и произведение переменных, положительно влияющих на рост переменной X_i , S_i^- и Π_i^- – соответственно сумма внешних факторов и произведение переменных, отрицательно влияющих на рост переменной X_i .

Графы причинно-следственных связей показателей авиационной безопасности



**Математическая модель системной динамики для
прогнозирования значений показателей безопасности АТС
(общий вид)**

$$\frac{dX_1(t)}{dt} = (f_{2-1}(X_2(t)) \cdot f_{3-1}(X_3(t)) \cdot f_{4-1}(X_4(t)) \cdot f_{5-1}(X_5(t)) \cdot f_{34-1}(X_{34}(t)) \cdot f_{37-1}(X_{37}(t)) \cdot f_{38-1}(X_{38}(t)) - f_{15-1}(X_{15}(t)) \cdot f_{18-1}(X_{18}(t)) \cdot f_{19-1}(X_{19}(t)) \cdot f_{20-1}(X_{20}(t)) \cdot f_{39-1}(X_{39}(t)) \cdot f_{40-1}(X_{40}(t))) / X_1^*$$

$$\frac{dX_2(t)}{dt} = (f_{1-2}(X_1(t)) \cdot f_{3-2}(X_3(t)) \cdot f_{4-2}(X_4(t)) \cdot f_{5-2}(X_5(t)) \cdot f_{34-2}(X_{34}(t)) - f_{15-2}(X_{15}(t)) \cdot f_{20-2}(X_{20}(t)) \cdot f_{30-2}(X_{30}(t)) \cdot f_{31-2}(X_{31}(t)) \cdot f_{35-2}(X_{35}(t))) / X_2^*$$

$$\frac{dX_3(t)}{dt} = (f_{1-3}(X_1(t)) \cdot f_{2-3}(X_2(t)) \cdot f_{4-3}(X_4(t)) \cdot f_{5-3}(X_5(t)) \cdot f_{34-3}(X_{34}(t)) - f_{15-3}(X_{15}(t)) \cdot f_{20-3}(X_{20}(t)) \cdot f_{30-3}(X_{30}(t)) \cdot f_{31-3}(X_{31}(t)) \cdot f_{35-3}(X_{35}(t))) / X_3^*$$

$$\frac{dX_4(t)}{dt} = (f_{1-4}(X_1(t)) \cdot f_{2-4}(X_2(t)) \cdot f_{3-4}(X_3(t)) \cdot f_{5-4}(X_5(t)) \cdot f_{34-4}(X_{34}(t)) - f_{15-4}(X_{15}(t)) \cdot f_{20-4}(X_{20}(t)) \cdot f_{30-4}(X_{30}(t)) \cdot f_{31-4}(X_{31}(t)) \cdot f_{35-4}(X_{35}(t))) / X_4^*$$

$$\frac{dX_5(t)}{dt} = (f_{14-5}(X_{14}(t)) \cdot f_{18-5}(X_{18}(t)) \cdot f_{20-5}(X_{20}(t)) \cdot f_{22-5}(X_{22}(t))) / X_5^*$$

...

$$\frac{dX_{40}(t)}{dt} = (f_{6-40}(X_6(t)) \cdot f_{7-40}(X_7(t)) \cdot f_{8-40}(X_8(t)) - f_{1-40}(X_1(t)) \cdot f_{33-40}(X_{32}(t)) \cdot f_{34-40}(X_{34}(t))) / X_{40}^*$$

Математическая модель системной динамики для прогнозирования значений показателей безопасности АТС (численный вид)

$$\frac{ds_{\text{трех}}(t)}{dt} = 0.12s_{\text{инф}}(t) + 0.06s_{\text{инф}}(t)\sin(t) - 0.005t^2 + 0.022t - 0.04 - 0.01t\sin(t)$$

$$\frac{ds_{\text{про}}(t)}{dt} = 0.00096s_{\text{нар}}^2(t) + 0.000224s_{\text{нар}}^2(t)\sin(t) + 0.00008s_{\text{нар}}^2(t)t^2 -$$

$$- 0.000064ts_{\text{нар}}^2(t) - 0.00048s_{\text{нар}}(t) + 0.00012s_{\text{нар}}(t)\sin(t) +$$

$$+ 0.00004t^2s_{\text{нар}}(t) - 0.000032ts_{\text{нар}}(t) - (0.016 + 0.056\cos(t)) +$$

$$+ 0.04\sin(t)(4 + s_{\text{трех}}^2(t)\lg s_{\text{трех}}(t))(\lg s_{\text{пер}}(t) - \lg 4)(\lg s_{\text{инф}}(t) - \lg 4) \lg \frac{s_{\text{кон}}(t)}{s_{\text{трех}}^2(t)s_{\text{кон}}^2(t)}$$

$$\frac{ds_{\text{пер}}(t)}{dt} = 0.15\lg s_{\text{кон}}(t) - 0.00025t^2 + 0.0011t - 0.002 - 0.0005t\sin(t)$$

$$\frac{ds_{\text{инф}}(t)}{dt} = 0.06s_{\text{пер}}(t) + 0.0015s_{\text{пер}}(t)$$

$$\frac{ds_{\text{пов}}(t)}{dt} = -0.01s_{\text{трех}}(t)\lg(0.125s_{\text{пер}}(t))s_{\text{инф}}(t)\lg(0.125s_{\text{кон}}(t)) - 0.003\cos(t) \times$$

$$\times s_{\text{трех}}(t)\lg(0.125s_{\text{пер}}(t))s_{\text{инф}}(t)\lg(0.125s_{\text{кон}}(t)) - 0.0025\sin(t)s_{\text{трех}}(t) \times$$

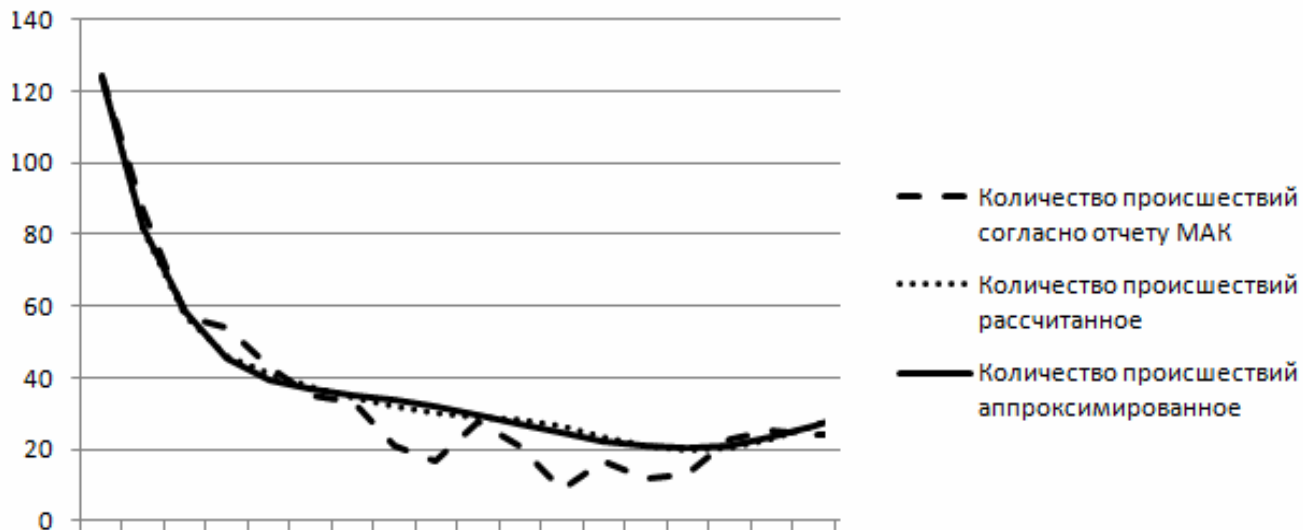
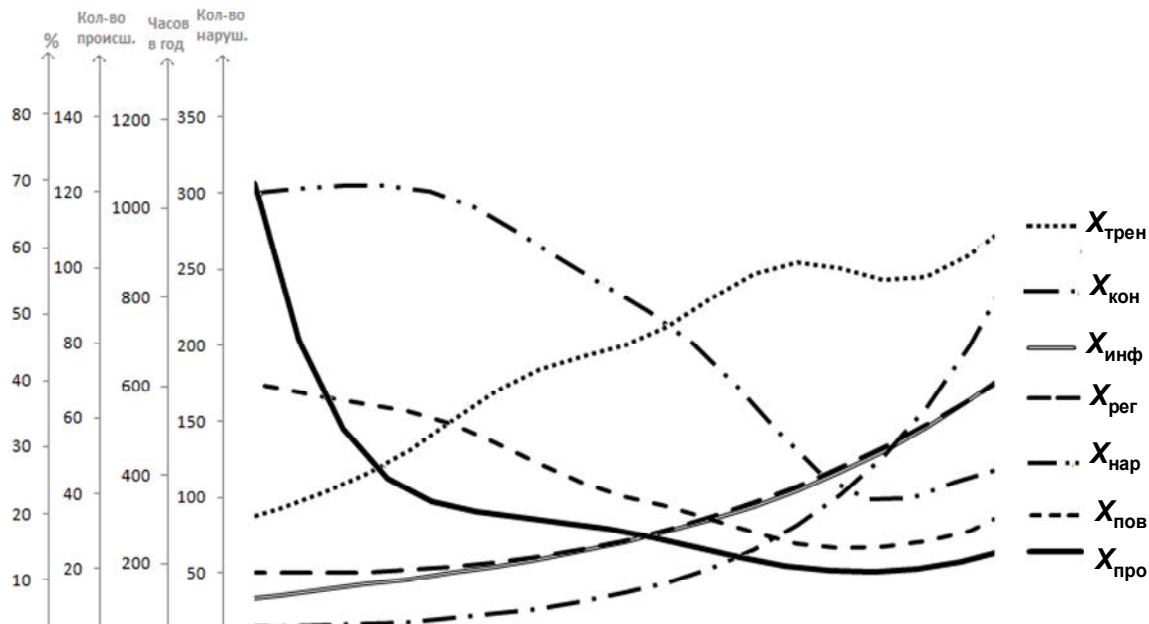
$$\times \lg(0.125s_{\text{пер}}(t))s_{\text{инф}}(t)\lg(0.125s_{\text{кон}}(t))$$

$$\frac{ds_{\text{нар}}(t)}{dt} = 0.005t^2 - 0.013t + 0.03 + 0.005t\sin(t) - 0.5\lg s_{\text{трех}}(t)\lg s_{\text{трех}}(t) -$$

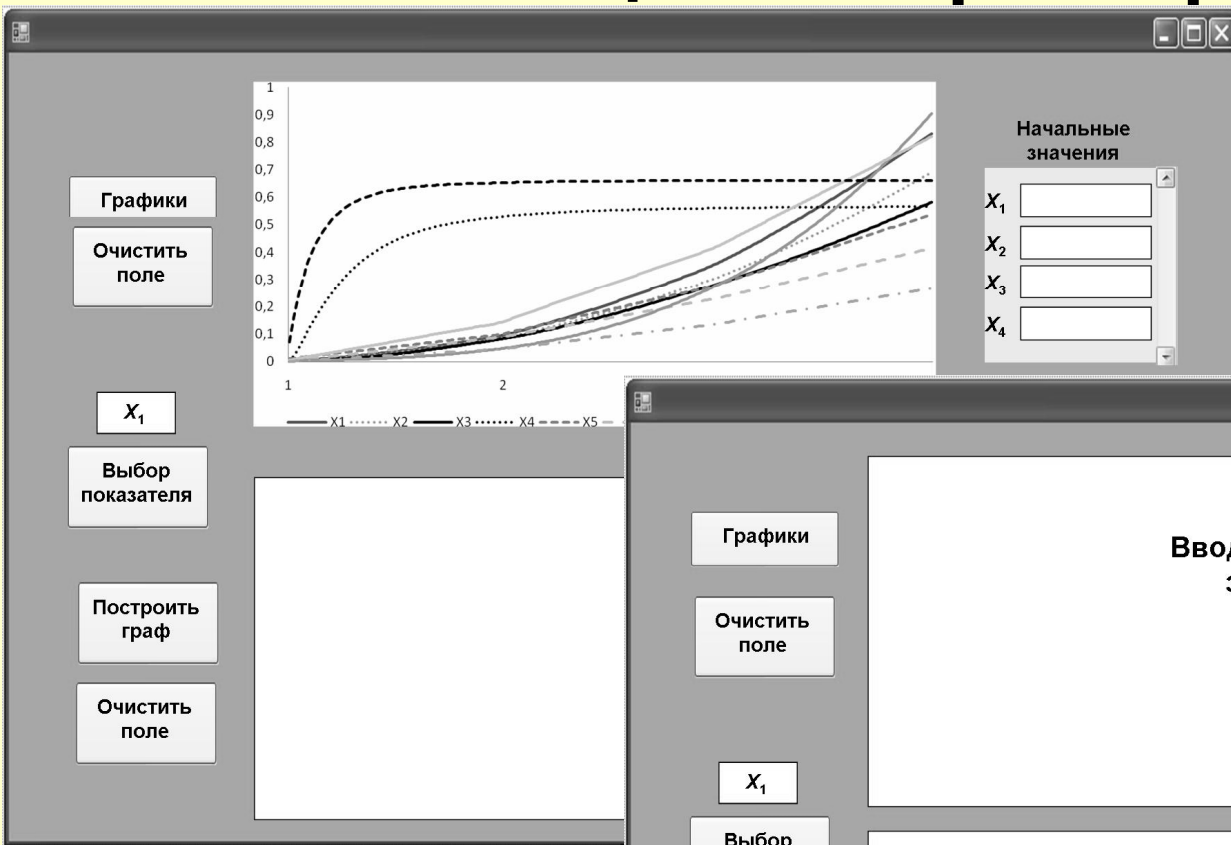
$$- 0.25\lg s_{\text{трех}}(t)\lg s_{\text{трех}}(t)\sin(t)$$

$$\frac{ds_{\text{кон}}(t)}{dt} = 0.4s_{\text{пер}}(t)\lg s_{\text{инф}}(t) + 0.2s_{\text{пер}}(t)\lg s_{\text{инф}}(t)\sin(t) - 0.025t^2 + 0.002t - 0.01$$

Численное решение задачи определения характеристик безопасности



Программно-информационный комплекс для определения значений показателей безопасности авиационных транспортных систем



This screenshot shows the same software window with annotations. A large white box in the center is labeled 'Ввод начальных значений' (Input of initial values) with an arrow pointing to the 'Начальные значения' panel. Another white box is labeled 'Определение границ временного интервала' (Definition of time interval boundaries) with an arrow pointing to the 'Временной интервал' (Time interval) panel. The 'Начальные значения' panel shows X₁ = 1, X₂ = 1, X₃ = 0,7, and X₄ = 0,5. The 'Временной интервал' panel shows t_н = 0 and t_к = 4. A 'Расчет показателей' (Calculate indicators) button is located at the bottom right.

Заключение

1. Проведен системный анализ проблемы обеспечения безопасности функционирования авиационных транспортных систем. В результате выполнена постановка задачи обеспечения безопасности авиационных транспортных систем в условиях критических сочетаний событий, разработаны методы и модели ее решения.
2. Выделены признаки критических сочетаний событий и их классы, использование которых позволяет облегчить анализ аварийных ситуаций в процессе функционирования авиационных транспортных систем, а также определить возможность возникновения маловероятных аварий и критических сочетаний событий.
3. Предложена классификация критических сочетаний событий в авиационных транспортных системах, необходимая для корректной структуризации и систематизации различных аспектов проблемы обеспечения безопасности авиационных транспортных систем. Выполнена постановка задачи управления авиационной транспортной системой по предложенному и обоснованному критерию безопасности. Установлено, что для ее решения необходимо разработать математические модели, численные методы, алгоритмы и комплексы программ, позволяющие осуществить оптимизацию целевой функции, характеризующей безопасность авиационных транспортных систем на различных временных интервалах.
4. Разработаны математические модели, позволяющие определить вероятности возникновения критических сочетаний событий в процессе функционирования авиационных транспортных систем с помощью решения систем дифференциальных уравнений для различных классов критических сочетаний событий, что позволяет обеспечить безопасность авиационных транспортных систем.

Перспективы исследований

- 1. Новые постановки задач, которые позволят учесть больше аспектов, добавление возмущений, погодных условий и др.**
- 2. Учет в моделях поведения человека, его неврологических, психофизиологических особенностей.**
- 3. Разработка и совершенствование численных методов (с помощью искусственных нейронных сетей) для систем, обладающих жесткостью и большой размерностью.**
- 4. Использование суперкомпьютеров для получения аналитических решений систем высокой размерности.**
- 5. Создание и совершенствование программного обеспечения.**

Спасибо за внимание !