



# МЕТОД КОННЕКТИВНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СЛОЖНЫХ ИНФОРМАЦИОННО- УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ ВНЕШНЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

*М.И. Савельев, ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ)*

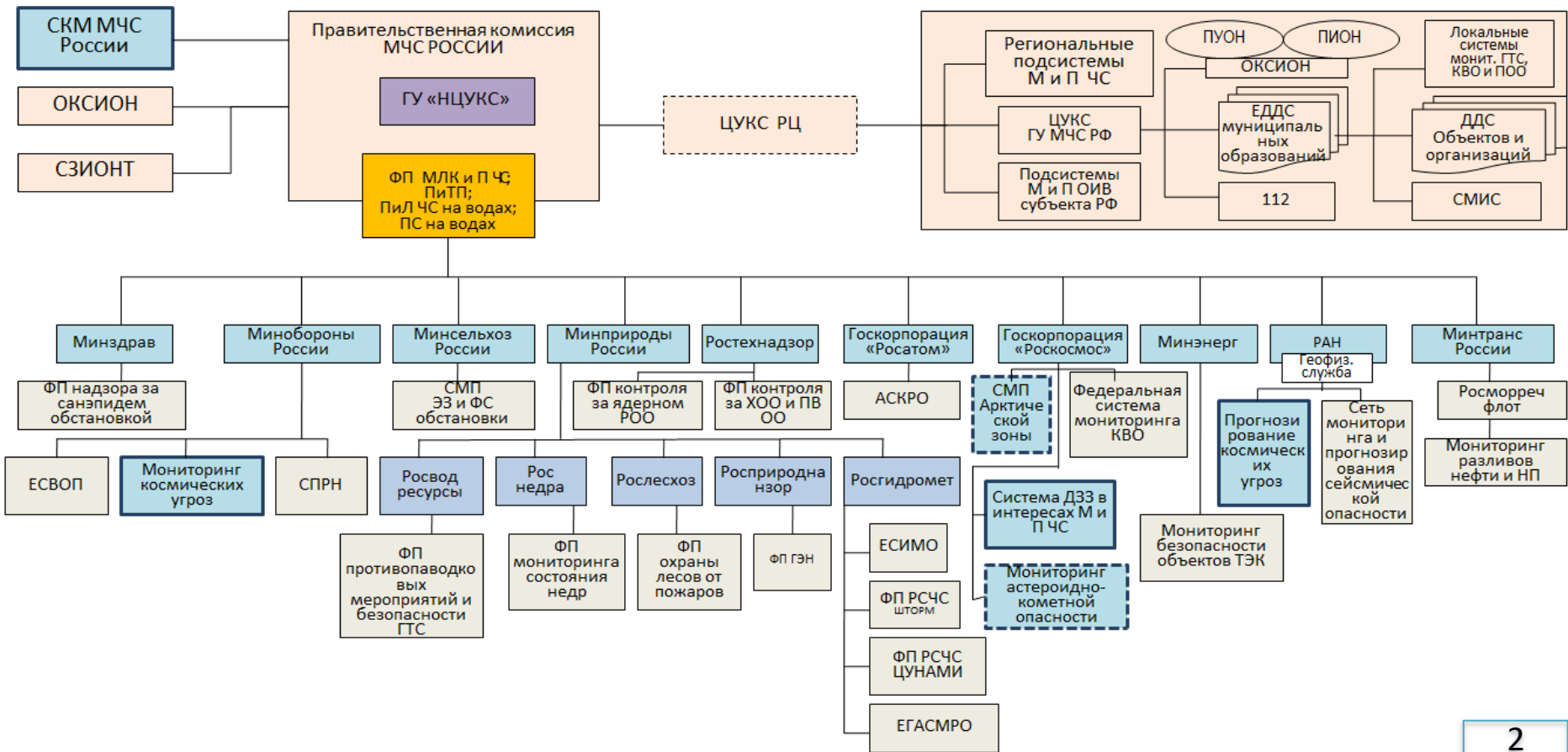
Двадцать вторая международная конференция  
«Современные проблемы дистанционного  
зондирования Земли из космоса»

11-15 ноября 2024 г.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия



# ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПОДСИСТЕМЫ РСЧС



# КОСМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЗЗ

## (орбитальный и наземный сегменты)

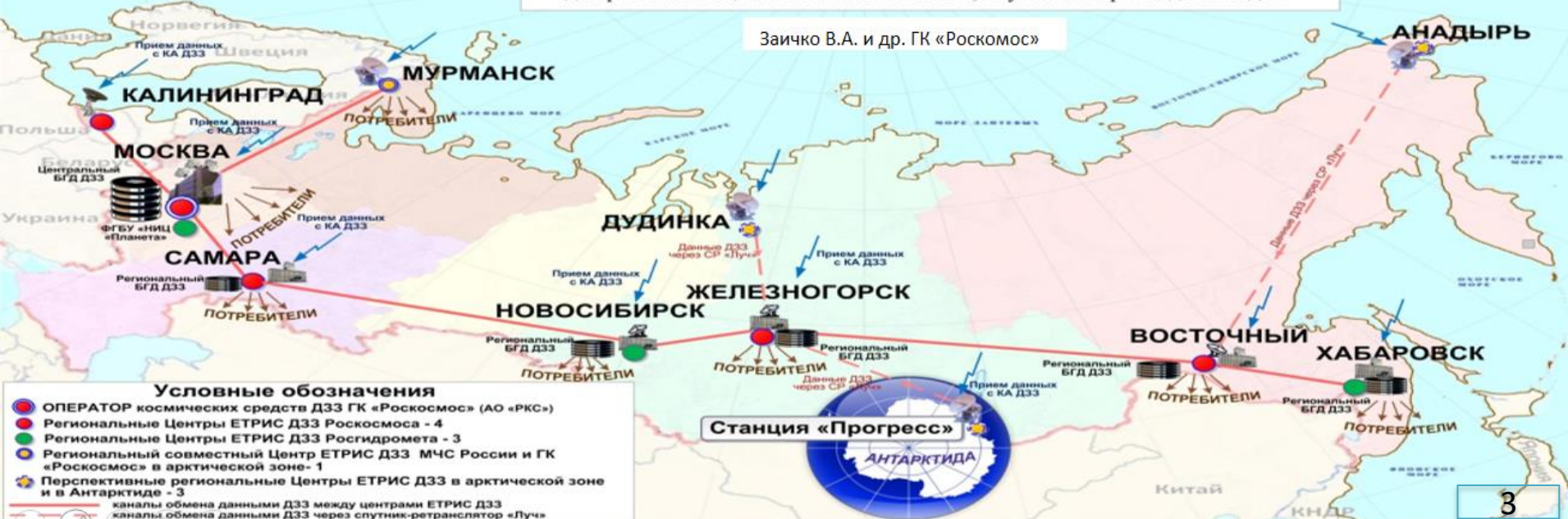
Спутник-ретранслятор «Луч-5В»

Спутник-ретранслятор «Луч-5А»

ОГ КА ДЗЗ

**Единая территориально-распределенная информационная система дистанционного зондирования (ЕТРИС ДЗЗ)** – совокупность территориально-распределенных наземных центров приема, сбора, обработки, хранения и распространения данных, получаемых с космических аппаратов ДЗЗ, функционирующая в целях обеспечения российских потребителей данными ДЗЗ и продуктами на их основе для решения социально-экономических, научных и прикладных задач

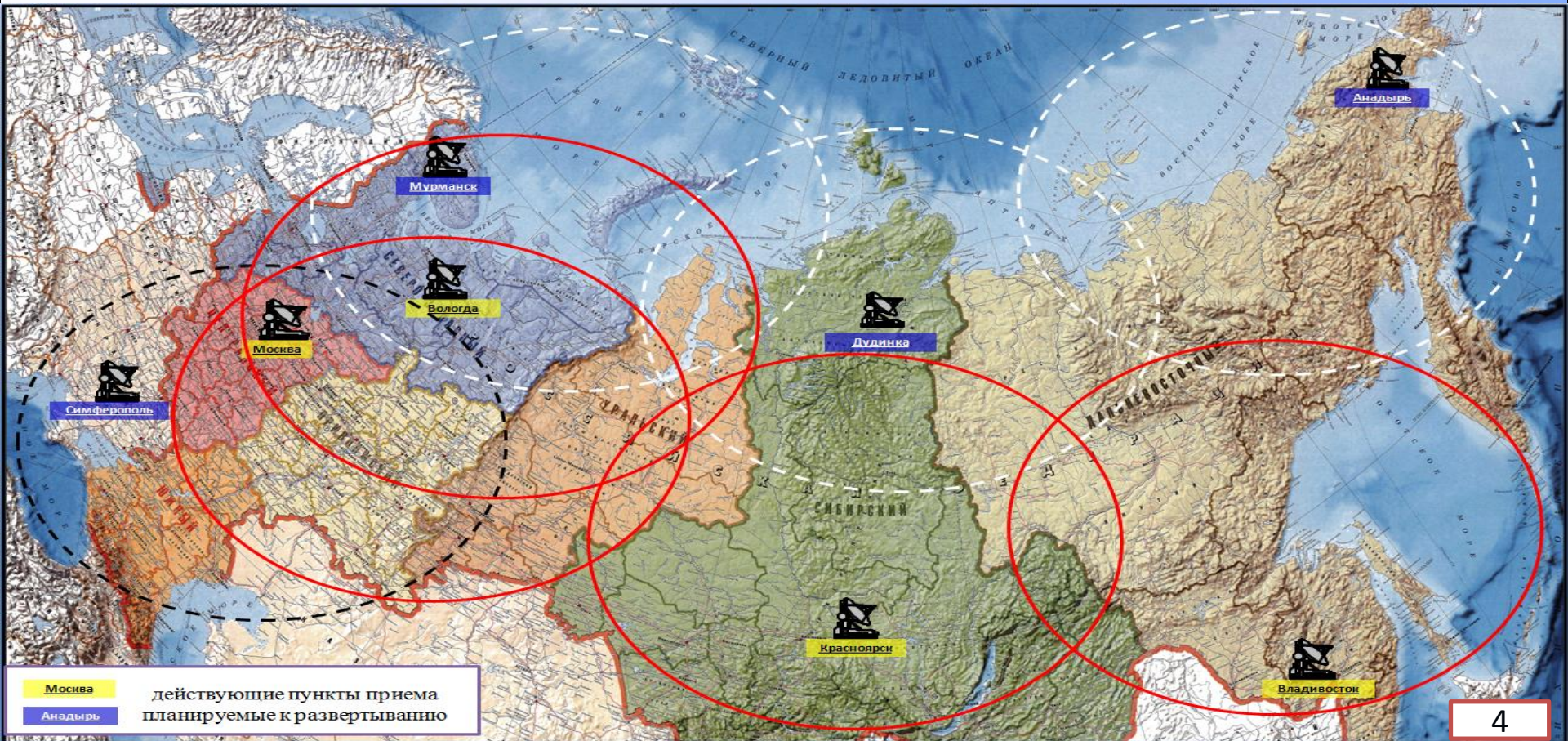
Заичко В.А. и др. ГК «Роскосмос»



**Условные обозначения**

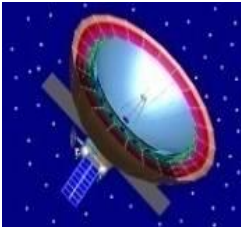
- ОПЕРАТОР космических средств ДЗЗ ГК «Роскосмос» (АО «РКС»)
  - Региональные Центры ЕТРИС ДЗЗ Роскосмоса - 4
  - Региональные Центры ЕТРИС ДЗЗ Росгидромета - 3
  - Региональный совместный Центр ЕТРИС ДЗЗ МЧС России и ГК «Роскосмос» в арктической зоне- 1
  - Перспективные региональные Центры ЕТРИС ДЗЗ в арктической зоне и в Антарктиде - 3
- каналы обмена данными ДЗЗ между центрами ЕТРИС ДЗЗ  
 - - - каналы обмена данными ДЗЗ через спутник-ретранслятор «Луч»

# СИСТЕМА КОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ МЧС РОССИИ (наземный сегменты)



Москва	действующие пункты приема планируемые к развертыванию
Анадырь	

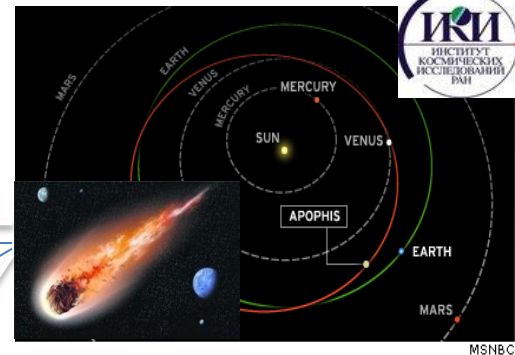
# Перспективная система предупреждения об астероидно-кометной опасности



## Пространство параметров

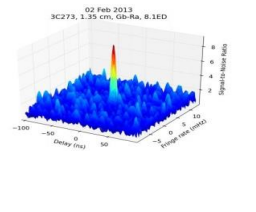
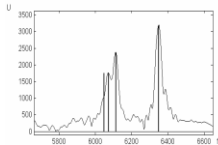
Происхождение (зарождение) –  
 масса – движение –  
 свечение – яркость –  
 спектр – цвет – форма –  
 размеры – дробление –  
 вращение – торможение –  
**взрыв**

РСДБ космос -  
 Земля



Наземно-орбитальная система телескопов и радиотелескопов (рабочий диапазон волн: видимый, инфракрасный, субмиллиметровый и миллиметровый)

Режим радиоинтерферометрии с РСДБ позволяет определить: орбиту, координаты ОНТ, пространственную структуру и интенсивность излучения, а также спектр и поляризацию и в перспективе - параметры взрыва



## Формирование каталога ОНТ



## Проблемы оценки эффективности сложных информационно-управляющих и систем



- 1. Проблема синтеза.** При разработке сложных информационно-управляющих систем (СИУС) в различных сферах их применения исходят из потребности обеспечить эффективное управление объектом соответствии с заданными требованиями.
- 2. Проблема выбора показателя эффективности.** Под эффективностью СИУС понимается мера, характеризующая достижение целей с определённым качеством управления по её прямому предназначению. Предполагает формирование параметрической функции СИУС, отражающее описание её состояния в различных условиях функционирования. Должен отвечать свойствам наблюдаемости, управляемости и устойчивости системы
- 3. Проблема выбора критерия эффективности СИУС.** Отражает инвариантность построения и чувствительность системы при её реконфигурации и деградации в условиях возмущающих воздействий. Критерий безотказной работы системы – структурная надёжность системы. Устойчивость системы – способность системы выполнять возложенные на неё функции управления и сохранять параметры в условиях воздействия дестабилизирующих факторов, проявления угроз и опасностей.
- 4. Проблема открытости построения системы.** Крoется в необходимости интеграции в рамках РСЧС отдельных систем и подсистем космического мониторинга в комплексную многофункциональную систему мониторинга и прогнозирования (предупреждения) чрезвычайных ситуаций, в том числе астероидно-кометного происхождения.

Классы сложных систем

Сложные динамические системы

Сложные информационно-управляющие системы

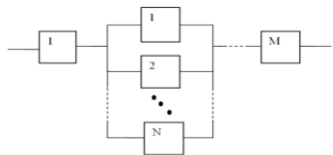
Показателя и критерии эффективности

Устойчивость по **А.М. Ляпунову** – устойчивость летательных аппаратов (функционирование автоматизированных систем управления (АСУ), описываемое системой дифференциальных уравнений возмущённого и невозмущённого движения).  
Применительно к СИУС, вопрос устойчивости сложных систем управления остаётся открытым.

Структурная надёжность – показатель работоспособности отдельных элементов сложных технических систем, информационно-управляющие систем в целом. Используются:

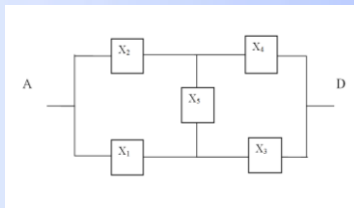
1. Методы с параллельно-последовательной структурой, содержащие элементы типа: «треугольник», «звезда» и мостиковые базовые элементы.
2. Логико-вероятностные методы для расчёта структурной надёжности сложных систем **П.С. Порецкого, И.А. Рябина** и других.

## Логико-вероятностный метод



$$P_c = \prod_m P_m (1 - \prod_n (1 - P_n))$$

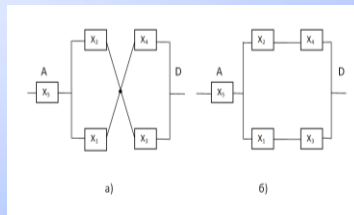
$$\forall m = \overline{1, M}; \forall n = \overline{1, N}.$$



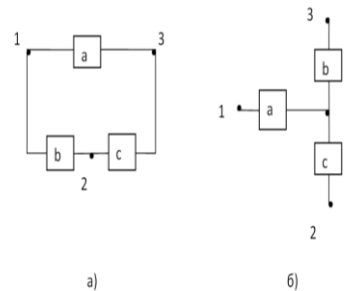
$$Y_{ad} = \begin{vmatrix} X_1 X_3 \\ X_2 X_4 \\ X_1 X_4 X_5 \\ X_2 X_3 X_5 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} X_1 X_3 \\ X_1 X_3 X_2 X_4 \\ X_1 X_3 X_2 X_4 X_1 X_4 X_5 \\ X_1 X_3 X_2 X_4 X_1 X_4 X_5 X_2 X_3 X_5 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} X_1 X_3 \\ X_1 X_3 X_2 X_4 \\ X_3 X_2 X_1 X_4 X_5 \\ X_1 X_4 X_2 X_3 X_5 \end{vmatrix}$$

Система с параллельно-последовательной структурой

$$\begin{cases} q_1 \approx q_{12} q_{31} \\ q_2 \approx q_{23} q_{12} \\ q_3 \approx q_{31} q_{23} \end{cases}$$



$$P_c = p_1 p_3 + (1 - p_1 p_3) p_2 p_4 + q_3 q_2 p_1 p_{45} + q_1 q_4 p_2 p_3 p_5$$



$$\begin{cases} q_{12} = \sqrt{q_1 q_2 / q_3} \\ q_{23} = \sqrt{q_2 q_3 / q_1} \\ q_{31} = \sqrt{q_1 q_3 / q_2} \end{cases}$$

Система с мостиковым базовым элементом (замыкание – обрыв – работоспособность)

$$P_{AD} = p_5 (1 - q_1 q_2) (1 - q_3 q_4) + (1 - p_5) (1 - (1 - p_1 p_3) (1 - p_2 p_4))$$

Системы со структурными элементами типа:  
а) – «треугольник»;  
б) – «звезда»

**Вывод:** Применение методов для оценки надёжности систем с параллельно-последовательной структурой, элементами типа: «треугольник», «звезда», с мостиковыми базовыми элементами и логико-вероятностного метода для расчёта структурной надёжности сложных систем большой размерности трудно реализуемо и не позволяют оценить устойчивость системы, поскольку не отражают управляемость, наблюдаемость и границ устойчивости системы в определённой области.

## Число перестановок в методах расчёта структурной надёжности





## Исходные положения:

1. По отношению к СИУС в качестве параметрического пространства должна выступать такая параметрическая функция, которая даёт количественную и качественную оценку **управляемости, наблюдаемости и устойчивости** системы.
2. **Под устойчивостью** СИУС понимается её способность сохранять по предназначению структурную надёжность в условиях воздействия дестабилизирующих факторов.
3. В отличие от устойчивости **управляемость** характеризует способность системы переходить из начального состояния в любое заданное и, наоборот, из любого заданного в начальное состояние. В свою очередь, **наблюдаемость** даёт возможность по значениям параметров системы определить её состояние.
4. Исследованию влияния возможного изменения связей в сложных системах управления, в том числе СИУС, на устойчивость их функционирования посвящено отдельное направление теории устойчивости, получившее в графовых  $G_c = f(A_c, X_c)$  представлениях систем название **коннективной устойчивости**.
5. Функция отображения  $f$  позволяет установить целевую функцию управления силами и средствами, вероятное состояние (работоспособность) элементов (вершин графа  $A_c$ ) и линий (дуг  $X_c$ ) взаимодействия СИУС (вероятную достижимость от управляющего к управляемым элементам или вероятность наличия связи между вершинами графа в зависимости от внешнего воздействия).
6. **Под коннективной устойчивостью** понимается способность систем сохранять связность системы и её элементов при возможных под воздействием изменениях связей в определенном диапазоне (области).
7. В исследованиях коннективной устойчивости сложных систем управления идут двумя путями. Первый путь предполагает максимально возможное **сокращение числа варьируемых связей** в системе, а второй путь сопряжён с **формированием специальных условий коннективной устойчивости**, позволяющих исключить перебор варьируемых связей или сократить его до минимума.

**Утверждение.** Если структура системы адекватно отражается графом  $G_c$ , на котором существует функция связности  $S(G_c)$  такая, что каждой дуге  $S(G_c), \forall i = j \in A_c$  ставится вероятность сохранения связи  $PS_{ij}$ , вершинам  $A_j$  вероятность работоспособного состояния элементов  $P(A_i)$  системы, то состояние равновесия системы по управлению объектом характеризуется областью (1) коннективной устойчивости:

$$Q_y(G_c) = \{LS_n(G_c), \dots, \max LS(G_c)_n, LS_g(G_c), n\}, \quad (1)$$

образованной на графе  $G_c$  множеством  $n$ , упорядоченных по вероятной достижимости путей между управляющим  $NV$  и управляемым  $KV$  объектами в пределах границ устойчивости:

нижней границы, характеризуемой  $k$ -ым минимальным путём (2):

$$LS_n(G_c) = \min_k \prod_{i=NV}^m (P(A_i) PS_{i,j+1})_k, \forall l = \overline{1, m}, NV = 1, KV = m; l \rightarrow i; (l+1) \rightarrow j; \forall l, l+1 \subset k = \overline{1, n}, \quad (2)$$

Верхней границы (3), отражающей интегральную надёжность графа  $G_c$ :

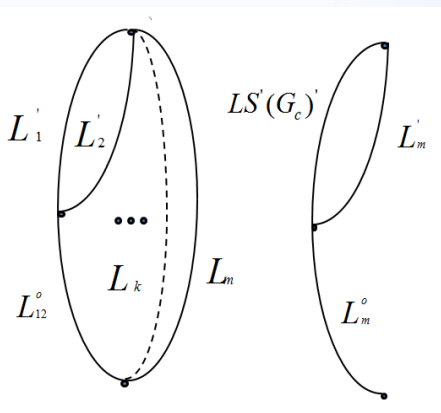
$$LS_g(G_c) = 1 - \prod_{k1}^{m1} (1 - LS(G_c)_{k1}) \prod_{k2}^{n2} (1 - LS(L(G_c)_r)_{k2}), m1, n2 \subset n, \\ \forall LS(G_c)_{k1} \cap LS(G_c)_{k1'} = 0; k1 \neq k1'; k1, k1' = \overline{1, m1}; \\ \{LS(L(G_c)_r)_{k2} = 0 \mid L(G_c)_r \cap L(G_c)_{r'} \neq 0; k2 \neq k2'; k2, k2' = \overline{1, n2}; r \neq r' \in n\} \quad (3)$$

с сохранением управляемости объектом на всей области.

При этом было принято во внимание, что граф  $G_c$ , отображающий структуру сложной системы управления, имеет две компоненты: подграф  $G_{c\Pi}$  типа  $\Pi$  с параллельным включением дуг и подграф  $G_{cH}$  типа  $H$  с непараллельно-последовательным включением дуг, а также множество путей от минимального до максимального по вероятной достижимости пути между вершинами графа.

$\max LS(L_{HK}, t) \xrightarrow{t} LS_B(G_C)$	<p>Система коннективно устойчива, когда максимальный по вероятной достижимости путь между Н и К объектами <math>\max LS(L_{HK}, t)</math> стремится в условиях внешнего воздействия к верхней границе <math>LS_B(G_C)</math> области устойчивости.</p>
$\max LS(L_{HK}, t) \xrightarrow{t} \min LS_H(L_{HK})$	<p>Система коннективно не устойчива, когда максимальный по вероятной достижимости путь между Н и К объектами <math>\max LS(L_{HK}, t)</math> стремится при внешнем воздействии к нижней границе <math>\min LS_H(L_{HK})</math> области устойчивости, характеризуемой значением до воздействия.</p>
$\max LS(L_{HK}, t) < \min LS_H(L_{HK})$	<p>Деградация системы или потеря управления объектом, когда максимальный по вероятной достижимости путь между Н и К объектами <math>\max LS(L_{HK}, t)</math> находится по своему значению в условиях внешнего воздействия за пределами нижней границы <math>\min LS_H(L_{HK})</math> области устойчивости.</p>
$\min LS_H(G_C) > \max LS(L_{HK}, t) > \min LS_H(L_{HK})$	<p>Частный случай. Система коннективно не стабильна, когда максимальный по вероятной достижимости путь между Н и К объектами <math>\max LS(L_{HK}, t)</math> при внешнем воздействии находится в пределах нижней границы <math>\min LS_H(G_C)</math>, характеризуемой интегральной структурной надёжностью, и минимальным по вероятной достижимости пути <math>\min LS_H(L_{HK})</math> между Н и К области устойчивости со значениями до воздействия.</p>

## Метод итерационных вычислений



## Метод интегральных аналитических вычислений

$$LS_{нк} = (1 - (1 - L_i)(1 - L_j)) - \Delta L_0$$

$$\Delta L_0 = \prod_m^M PS_m \prod_n^N PS_n PS_o (1 - PS_o),$$

$$\forall m = \overline{1, M}; \quad \forall n = \overline{1, N}.$$

$$PS_m \in L_i; \quad PS_n \in L_j; \quad PS_o \in L_i \cap L_j;$$

$$r=2: LS(L_{12}) = (1 - (1 - L_1)(1 - L_2)) - L_1' L_2' L_{12}^0 (1 - L_{12}^0);$$

\*\*\*

$$r=k: LS(L_{1,k-1,k}) = (1 - (1 - LS(L_{1,k-1})) (1 - L_k)) - LS'(L_{1,k-1}') L_k' L_{1,k-1,k}^0 (1 - L_{1,k-1,k}^0);$$

\*\*\*

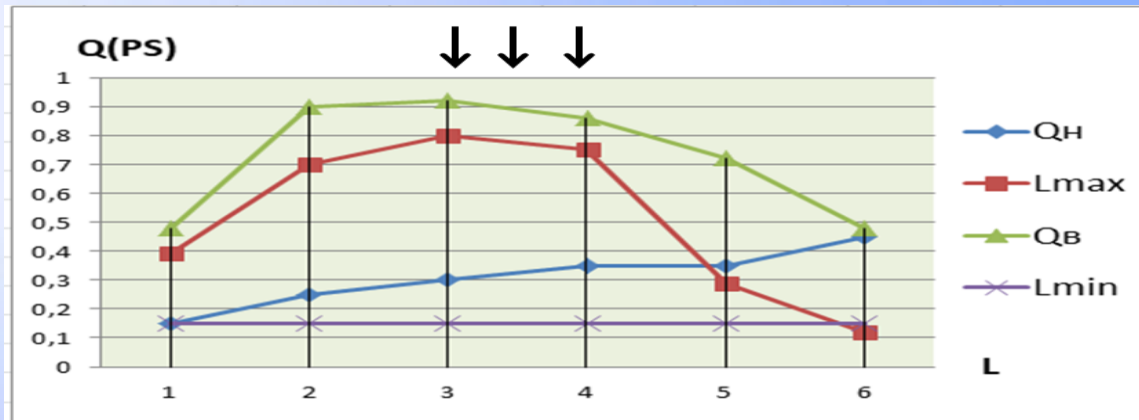
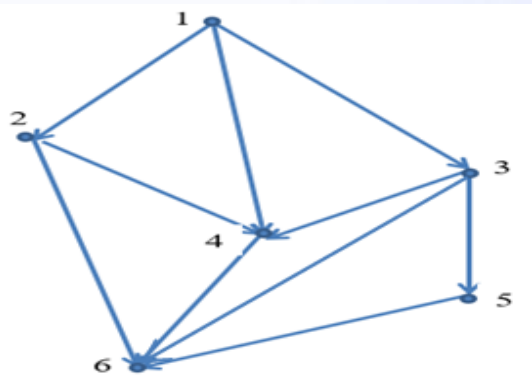
$$r=m: LS(L_{1,m-1,m}) = (1 - (1 - LS(L_{1,m-1})) (1 - L_m)) - LS'(L_{1,m-1}') L_m' L_{1,m-1,m}^0 (1 - L_{1,m-1,m}^0),$$

$L_k$  – вероятный по достижимости путь между начальной и конечной вершинами графа;

$LS(L_{1,k-1,k}) = LS(G_c)$  – интегральная надёжность расчётного графа с зависимыми путями между начальной и конечной вершинами по завершению  $r = k$  - итерации;

$LS'(L_{1,k-1}')$  – интегральная надёжность графа до пересечения с  $L_k$  - путём на  $r = k - 1$  - итерации;

$L_{1,k-1,k}^0$  – вероятный по достижимости путь с общими дугами, принадлежащими, как  $L_{1,k-1}$ , так и  $L_k$  путям на  $r = k - 1$  - итерации.



Граф условного фрагмента СУК РСЧС

Область устойчивости фрагмента СУК РСЧС в условиях воздействия

Матрица смежности графа

	1	2	3	4	5	6
1	1,0	0,5	0,7	0,6		
2		1,0		0,6		0,7
3			1,0	0,7	0,8	0,8
4				1,0		0,5
5					1,0	0,7
6						1,0

Параметры коннективной устойчивости СУК РСЧС

Пут и	Дуги	Параметры			
		$Q_n$	$Q_{max}$	$Q_b$	
$L_1$	$PS_{12}PS_{24}PS_{46}$	0,5x0,6x0,5	0,15	0,39	0,48
$L_2$	$PS_{13}PS_{34}PS_{46}$	0,7x0,7x0,5	0,25	0,7	0,9
$L_3$	$PS_{14}PS_{46}$	0,6x0,5	0,30	0,8	0,92
$L_4$	$PS_{12}PS_{26}$	0,5x0,7	0,35	0,75	0,86
$L_5$	$PS_{13}PS_{36}$	0,7x0,5	0,35	0,29	0,72
$L_6$	$PS_{13}PS_{35}PS_{56}$	0,7x0,8x0,8	0,45	0,12	0,47

1. Коннективная устойчивость СИУС, характеризуемой областью в пределах верхней (максимальная структурная надёжность) и нижней (минимальная структурная надёжность) границ устойчивости, устойчива, когда вероятный по достижимости путь в условиях воздействия между управляющим и управляемым объектами стремится к верхней границе устойчивости и неустойчива при стремлении пути к нижней границе устойчивости, а за её пределами – функционирование системы приводит к потере управляемости объектом.
2. Расчёт структурной надёжности сложной информационно-управляющей системы, топология которой отображена расчётным графом типа **H**, содержащего зависимые пути между произвольной парой вершин, производится путём преобразования графа с зависимыми путями в граф типа **П** с условно независимыми путями и последующей оценкой его надёжности согласно аналитической формуле для параллельной структуры за вычетом оправки, образованной произведением вероятностей наличия всех дуг в зависимых путях, на вероятность отсутствия общих дуг в этих зависимых путях.
3. Предложенный графоаналитический метод в его модификациях (интегральных аналитических и итерационных вычислений) определения структурной надёжности позволяет определять верхнюю границу области коннективной устойчивости, осуществлять синтез и структурную оптимизацию сложных информационно-управляющих систем.



*СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!*

