

МЕТОДОЛОГИЯ И ТЕХНОЛОГИИ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО АНАЛИЗА КРИТИЧНОСТИ ОТКАЗОВ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ОБЩЕСУДОВЫХ СИСТЕМ

А. Н. Павлов, А. Ю. Кулаков, Д. А. Павлов (Санкт-Петербург)

Введение

Особую опасность для современных сложных технических систем (СТС) представляют причины, которые приводят к возникновению кризисных ситуаций, аварий и катастроф, имеющих природно-экологические, технико-производственные или антропогенно-социальные причины. В этих условиях обеспечение непрерывности технологических процессов и повышение надежности, безопасности и живучести соответствующих СТС является одним из важнейших стратегических направлений развития современных социально-экономических и технических комплексов.

Для успешного решения возложенных на СТС задач необходимо, чтобы данные системы были управляемы, т.е. способны изменять свою структуру (структуры), состояния, параметры, способы функционирования в различных условиях обстановки. Широкое распространение на практике при решении задач обеспечения надежности, безопасности и живучести СТС в рамках развиваемой в настоящее время теории управления структурной динамикой [1] получил такой вариант управления структурами СТС как реконфигурация. Поэтому для достижения указанных целей необходимо осуществлять управление реконфигурацией СТС.

Однако наряду с управляющими воздействиями в контурах управления СТС присутствуют и соответствующие возмущающие воздействия, имеющие различную природу и характер своего проявления. Указанные возмущающие воздействия способны ухудшить качество функционирования объекта вплоть до потери работоспособности. Для учёта данных воздействий целесообразно при описании структурной динамики СТС обеспечить решение задач многокритериального оценивания, анализа и выбора структурного состояния СТС, имеющих монотонные и немонотонные, однородные и неоднородные, равноценные и неравноценные структуры (рис. 1) в условиях неполноты, неопределенности, неточности и противоречивости информации.

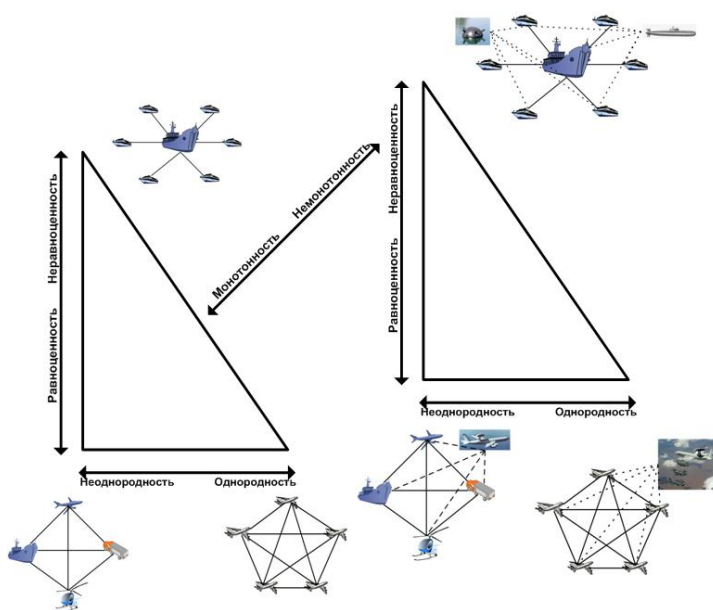


Рисунок 1. Интерпретация свойств однородности, равноценности, монотонности СТС

Методология исследования критичности отказов элементов сложных технических систем

При исследовании СТС, как правило, выделяют функциональные, технологические, технические, топологические и организационные структуры. Согласно функционально-структурного подхода к описанию объектов любой природы (в том числе и общесудовых систем (ОСС)) [2, 3], особенно на этапах проектирования и создания СТС, функциональные и технологические структуры, определяющие порядок выполнения системой отдельных функций, решения последовательности задач и выполнения комплекса операций, позволяющих достичь требуемого положительного эффекта или целей управления, занимают первостепенное значение по отношению к остальным структурам. При этом на ранних этапах жизненного цикла СТС должны быть синтезированы такие взаимосвязанные множества функций и структур, а также внесён такой уровень избыточности в указанные множества, при которых на этапе применения СТС по целевому назначению имела бы возможность гибко реагировать на все расчётные и нерасчётные нештатные ситуации, вызывающие деградацию и реконфигурацию её структур.

На основании сказанного представляется вполне оправданным выделить два направления при исследовании структурного построения СТС:

- разработка методологических и методических основ исследования монотонных и немонотонных, однородных и неоднородных структур СТС;
- разработка методологических и методических основ исследования равнозначных и неравнозначных структур СТС, заключающегося в многокритериальном анализе и выявлении критичных функциональных элементов (ФЭ) СТС, отказ которых приводит к изменению структурного состояния системы.

Говоря в целом об исследовании структурно-сложных объектов необходимо, прежде всего, отметить, что к настоящему времени значительный опыт накоплен в решении задач логико-вероятностного, марковского и статистического анализа свойств надежности, безопасности и живучести данных объектов. Как показывает анализ, в основном модели исследования надежности, безопасности и живучести СТС, с одной стороны, предполагают вероятностную интерпретацию обрабатываемых данных и полученных статистических выводов, с другой стороны, сводятся к построению соответствующих структурных функций путем ортогонализации функций алгебры логики (ФАЛ) и замещением логических аргументов в ФАЛ вероятностями их истинности, логических операций соответствующими арифметическими.

Среди указанных методов можно выделить классические логико-вероятностные методы (ЛВМ), в основе которых лежат работы школы профессора Рябинина И. А. [4]. Для снятия ограничения на монотонность и обеспечения возможности построения логических условий функционирования ФЭ как монотонных систем, так и любых немонотонных сложных системных объектов и процессов профессором Можаяевым А. С. был разработан общий логико-вероятностный метод (ОЛВМ) [5], являющийся развитием классических методов логико-вероятностного исчисления, позволяющих исследовать монотонные системы.

Учет факторов неопределенности обусловлен требованием системного принципа сочетания детерминизма и антидетерминизма, но использование для этого вероятностного подхода, с одной стороны, является не единственно возможным способом учета неопределенности, а с другой стороны, предполагает статистическую состоятельность факторов неопределенности и возможность получения достоверных данных о вероятностных характеристиках случайных параметров, с помощью которых описываются учитываемые факторы неопределенности.

Поэтому следует осуществлять при формализации факторов неопределенности гармоничное сочетание как вероятностного, так и нечетко-возможностного пространства и соответствующих им сигма-алгебр и мер.

Проведенный в работах [6] анализ современных методов исследования монотонных и немонотонных, однородных и неоднородных структур сложных объектов с позиции логико-вероятностного и нечетко-возможностного подходов позволил предложить оригинальную концепцию обобщенного генома структурного построения различных объектов. Под геномом структуры понимается вектор $\chi = (\chi_0, \chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n)$, компонентами которого являются коэффициенты полинома $T(Q) = \chi_0 + \chi_1 Q + \chi_2 Q^2 + \dots + \chi_n Q^n$ отказа структуры, составленной из однородных элементов. Используя геном структуры, можно вычислить оценки вкладов ФЭ в показатель надежности ее функционирования при различных логических условиях выполнения технологических операций СТС.

В случае задания логической структуры, описывающей процесс функционирования СТС и включающей в себя взаимосвязанные функции ее ФЭ, однородные по вероятности их не реализации (одинаковые по значениям вероятности) [4] вычисление

осуществляется по формуле $F_{\text{однор}}(\vec{\chi}) = (\chi_0, \chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n) \cdot \left(1, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \dots, \frac{1}{n+1}\right)^T$. В случае не-

однородности структуры (различные по значениям вероятности не реализации функций элементов) по следующей формуле $F_{\text{неоднор}}(\vec{\chi}) = (\chi_0, \chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n) \cdot \left(1, \frac{1}{2}, \frac{1}{2^2}, \dots, \frac{1}{2^n}\right)^T$. А в

случае возможности наступления событий, связанных с невыполнением своих функций элементами СТС и вызванных отказами ресурсов, обеспечивающих реализацию указанных функций, вычисление представляет собой интегрирование по мере возможности $F_{\text{однорвозм}}(\vec{\chi}) = \sup_{\mu \in [0,1]} \min\{T(\mu), g(\mu)\} = \sup_{\alpha \in [0,1]} \min\{\alpha, P(\{\mu | T(\mu) \geq \alpha\})\}$.

Далее перечисленные условия будем для краткости обозначать: заданы однородные ФЭ; заданы неоднородные ФЭ; заданы возможностные ФЭ.

Учитывая вышесказанное и подход к многокритериальному оцениванию критичности отказов ФЭ СТС на основе нечеткой логики и метода теории планирования эксперимента, изложенной в работе [7], предлагается методика многокритериального оценивания интегральных вкладов ФЭ СТС, состоящая из следующих четырех этапов.

Этап I – построение схемы функциональной целостности СТС, задание логических условий выполнения технологических операций ФЭ СТС, а также построение многочленов функций работоспособности перечисленных элементов и подсистем, заданных на вероятностном пространстве, по каждому из рассматриваемых логических условий.

Этап II – логико-вероятностное и нечетко-возможностное моделирование, расчет и оценивание вкладов ФЭ СТС в показатель надежности ее функционирования при следующих вариантах задания исходных данных: заданы однородные ФЭ; заданы неоднородные ФЭ; заданы возможностные ФЭ.

Этап III – построение интегрального показателя вкладов ФЭ в показатель надежности функционирования СТС. На данном этапе в качестве правила согласования частных показателей критичности используется комбинация метода нечеткого логического вывода и метода теории планирования эксперимента. Указанный подход позволяет формализовать опыт (знания) эксперта (группы экспертов) в виде прогностических моделей построения интегрального показателя вкладов в многомерном критериальном пространстве и учесть комплексное влияние одновременно нескольких частных показа-

телей критичности на интегральный показатель критичности отказов (интегральных вкладов) ФЭ СТС. За счет этого выявляется нелинейный характер влияния частных показателей критичности на интегральный показатель критичности отказов, и повышается достоверность принимаемых решений.

Этап IV – ранжирование по степени критичности отказов ФЭ СТС. Данный этап предназначен непосредственно для вычисления интегральных оценок вкладов ФЭ в показатель надежности функционирования СТС и их ранжирования по степени критичности.

Иллюстрация применения методики многокритериального анализа критичности отказов ФЭ общесудовой системы

Рассмотрим более подробно содержание перечисленных этапов реализации предлагаемой методики для общесудовой системы (ОСС) танкеров. В результате выполненного анализа технологических операций функционирования ОСС разработана ее структурная схема функциональной целостности (СФЦ), представленная на рис. 2.

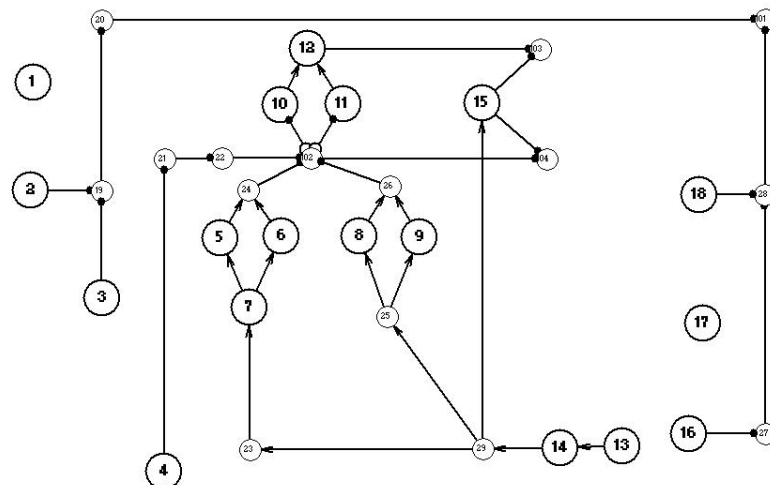


Рисунок 2. Схема функциональной целостности надежности и безопасности ОСС

Оценивание критичности отказов будем проводить для следующих ФЭ ОСС: 1 – Контроль системы жидкого груза (КСЖГ); 2 – Оборудование системы жидкого груза (СЖГ); 3 – Спецвентиляция (СВ) системы жидкого груза; 4 – Система борьбы с пожарами (СПЖ); 5 – Линия специальных измерительных приборов; 6 – Линия специальных измерительных приборов; 7 – Преобразователь питания; 8 – Канал измерения параметров состояния; 9 – Канал измерения параметров состояния; 10 – Датчики аварийной сигнализации в танках; 11 – Датчики аварийной сигнализации ОСС; 12 – Управление противоаварийной автоматической защиты (ПАЗ); 13 – Источник питания системы электроснабжения (СЭС); 14 – Стойка питания системы электроснабжения (СЭС); 15 – Система мониторинга ОСС (СМ); 16 – Сигнализация системы питания (ССП); 17- -Главная энергетическая установка (ГЭУ); 18- -Главный двигатель (пропульсивная установка) (ГД).

При построении данной СФЦ применялся прямая логика рассуждений. Каждая функциональная вершина 1-18 СФЦ представляет исход x_i , $i = 1, \dots, 18$ безотказности (работоспособности, реализации собственных функций и т.п.) соответствующими элементами (подсистемами) ОСС.

С помощью фиктивных вершин 19-29, 101-104 в СФЦ на рис. 2 выполнены группировки условий реализации или не реализации технологических операций, при-

веденных в описании функциональной схемы ОСС, которые позволяют задать логические условия, соответствующие поставленным задачам анализа надежности и безопасности ОСС в целом.

При определении степени критичности отказов реализации собственных функций ФЭ ОСС будем рассматривать следующие конкретные условия:

- заданы логические условия безотказного функционирования (надежности) ОСС;
- заданы логические условия возникновения проектной аварии ОСС;
- заданы логические условия возникновения запроектной аварии ОСС (перерастания аварии в катастрофу);
- заданы логические условия возникновения и локализации запроектной аварийной ситуации ОСС.

Прямые выходы y_1 и y_{17} функциональных вершин 1 и 17 определяют условия безотказности подсистем Контроля жидкого груза и ГЭУ.

Прямой выход y_{101} фиктивной вершины 101 определяет группу условий не возникновения отказов таких элементов, которые отнесены (по уровню последствий) к функциональным отказам и проектным авариям ОСС (не требуют их локализации средствами ПАЗ).

Прямой выход y_{102} фиктивной вершины 102 определяет условия не возникновения (в ходе непосредственных физических измерений) запроектной аварийной ситуации (ЗАС) исследуемого ОСС.

Инверсный выход \bar{y}_{102} определяет условие возникновения запроектной аварийной ситуации, которая должна локализоваться посредством безотказной работы оборудования ПАЗ и Системы мониторинга.

Прямой выход y_{104} фиктивной вершины 104 определяет условия безотказной работы тех подсистем, которые обеспечивают непосредственные физические измерения и в совокупности определяют условия не возникновения запроектной аварийной ситуации ОСС.

Прямой выход y_{103} , фиктивной вершины 103, определяет реализацию условия возникновения запроектной аварийной ситуации и ее успешную локализацию посредством безотказной работы оборудования системы ПАЗ и Системы мониторинга (элемент 15). Это означает сведение ЗАС к штатному уровню последствий, т.е. к проектной аварии.

Таким образом, логическое условие безотказности функционирования ОСС составляет $Y_{OCC} = y_1 \cdot y_{17} \cdot y_{101} \cdot y_{104}$. Соответствующий многочлен функции безотказности функционирования ОСС имеет следующий вид

$$\begin{aligned}
 P_{OCC} = & P1 P2 P3 P4 P6 P7 P9 P13 P15 P16 P17 P18 P14 + \\
 & + P1 P2 P3 P4 P5 Q6 P7 P9 P13 P15 P16 P17 P18 P14 + \\
 & + P1 P2 P3 P4 P6 P7 P8 Q9 P13 P15 P16 P17 P18 P14 + \\
 & + P1 P2 P3 P4 P5 Q6 P7 P8 Q9 P13 P15 P16 P17 P18 P14.
 \end{aligned}$$

Логическое условие возникновения проектной аварии ОСС составляет $Y_{ПА} = \bar{y}_{101} \cdot y_{103}$. Соответствующий многочлен функции возникновения проектной аварии ОСС имеет следующий вид

$$\begin{aligned}
 P_{ПА} = & P2 P3 P4 P7 Q8 Q9 P10 Q11 P12 P13 P14 P15 P16 P18 + \\
 & + P2 P3 P4 Q5 Q6 P7 P10 Q11 P12 P13 P14 P15 P16 P18 + \\
 & + P2 P3 P4 P7 Q8 Q9 P11 P12 P13 P14 P15 P16 P18 + \\
 & + P2 P3 P4 Q5 Q6 P7 P11 P12 P13 P14 P15 P16 P18 + \\
 & + Q18 + \\
 & + Q16 P18 +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + Q_3 P_{16} P_{18} + \\
& + Q_2 P_3 P_{16} P_{18} + \\
& + P_2 P_3 Q_7 P_{11} P_{12} P_{13} P_{14} P_{15} P_{16} P_{18} + \\
& + P_2 P_3 Q_4 P_7 P_{11} P_{12} P_{13} P_{14} P_{15} P_{16} P_{18} + \\
& + P_2 P_3 Q_7 P_{10} Q_{11} P_{12} P_{13} P_{14} P_{15} P_{16} P_{18} + \\
& + P_2 P_3 Q_4 P_7 P_{10} Q_{11} P_{12} P_{13} P_{14} P_{15} P_{16} P_{18} - \\
& - P_2 P_3 P_4 Q_5 Q_6 P_7 Q_8 Q_9 P_{11} P_{12} P_{13} P_{14} P_{15} P_{16} P_{18} - \\
& - P_2 P_3 P_4 Q_5 Q_6 P_7 Q_8 Q_9 P_{10} Q_{11} P_{12} P_{13} P_{14} P_{15} P_{16} P_{18}.
\end{aligned}$$

Логическое условие возникновения запроектной аварии ОСС (перерастания аварии в катастрофу) составляет $Y_{3A} = \bar{y}_{102} \cdot \bar{y}_{103}$. Соответствующий многочлен функции возникновения запроектной аварии ОСС имеет следующий вид

$$\begin{aligned}
P_{3A} = & P_4 Q_5 Q_6 P_7 Q_{10} Q_{11} P_{12} P_{13} P_{14} P_{15} + \\
& + P_4 P_7 Q_8 Q_9 Q_{10} Q_{11} P_{12} P_{13} P_{14} P_{15} + \\
& + P_4 Q_5 Q_6 P_7 Q_{12} P_{13} P_{14} P_{15} + \\
& + P_4 P_7 Q_8 Q_9 Q_{12} P_{13} P_{14} P_{15} + \\
& + P_4 P_7 Q_8 Q_9 P_{13} P_{14} Q_{15} + \\
& + P_4 Q_5 Q_6 P_7 P_{13} P_{14} Q_{15} + \\
& + Q_7 P_{13} P_{14} Q_{15} + \\
& + Q_4 P_7 P_{13} P_{14} Q_{15} + \\
& + Q_7 Q_{10} Q_{11} P_{12} P_{13} P_{14} P_{15} + \\
& + Q_4 P_7 Q_{10} Q_{11} P_{12} P_{13} P_{14} P_{15} + \\
& + Q_{13} + \\
& + P_{13} Q_{14} + \\
& + Q_7 Q_{12} P_{13} P_{14} P_{15} + \\
& + Q_4 P_7 Q_{12} P_{13} P_{14} P_{15} - \\
& - P_4 Q_5 Q_6 P_7 Q_8 Q_9 P_{13} P_{14} Q_{15} - \\
& - P_4 Q_5 Q_6 P_7 Q_8 Q_9 Q_{12} P_{13} P_{14} P_{15} - \\
& - P_4 Q_5 Q_6 P_7 Q_8 Q_9 Q_{10} Q_{11} P_{12} P_{13} P_{14} P_{15}.
\end{aligned}$$

Логическое условие возникновения и локализации запроектной аварийной ситуации ОСС составляет $Y_{\text{Локализации ЗАС}} = \bar{y}_{102} \cdot y_{103}$. Соответствующий многочлен функции возникновения и локализации запроектной аварийной ситуации ОСС имеет следующий вид

$$\begin{aligned}
P_{\text{ЛЗАС}} = & P_4 P_7 Q_8 Q_9 P_{10} Q_{11} P_{12} P_{13} P_{14} P_{15} + \\
& + P_4 Q_5 Q_6 P_7 P_{10} Q_{11} P_{12} P_{13} P_{14} P_{15} + \\
& + P_4 P_7 Q_8 Q_9 P_{11} P_{12} P_{13} P_{14} P_{15} + \\
& + P_4 Q_5 Q_6 P_7 P_{11} P_{12} P_{13} P_{14} P_{15} + \\
& + Q_7 P_{11} P_{12} P_{13} P_{14} P_{15} + \\
& + Q_4 P_7 P_{11} P_{12} P_{13} P_{14} P_{15} + \\
& + Q_7 P_{10} Q_{11} P_{12} P_{13} P_{14} P_{15} + \\
& + Q_4 P_7 P_{10} Q_{11} P_{12} P_{13} P_{14} P_{15} - \\
& - P_4 Q_5 Q_6 P_7 Q_8 Q_9 P_{11} P_{12} P_{13} P_{14} P_{15} - \\
& - P_4 Q_5 Q_6 P_7 Q_8 Q_9 P_{10} Q_{11} P_{12} P_{13} P_{14} P_{15}.
\end{aligned}$$

Далее по результатам экспертного опроса определяется интегральный вклад ФЭ ОСС в показатель надежности ее функционирования ($Y_{\text{инт}}$) с учетом их вкладов в выполнение заданных логических условий $Y_{\text{ОСС}}, Y_{\text{ПА}}, Y_{\text{ЗА}}, Y_{\text{ЛЗАС}}$ по формуле:

$$\begin{aligned}
Y_{\text{инт}} = & 0.489063 - 0.04719Y_{\text{ОСС}} + 0.137813Y_{\text{ПА}} + 0.237813Y_{\text{ЗА}} + 0.059688Y_{\text{ЛЗАС}} + \\
& - 0.02344Y_{\text{ПА}}Y_{\text{ЗА}} + 0.010938Y_{\text{ПА}}Y_{\text{ЛЗАС}} + 0.010938Y_{\text{ЗА}}Y_{\text{ЛЗАС}} + \\
& - 0.00969Y_{\text{ОСС}}Y_{\text{ПА}}Y_{\text{ЗА}} - 0.01406Y_{\text{ОСС}}Y_{\text{ПА}}Y_{\text{ЗА}}Y_{\text{ЛЗАС}}
\end{aligned}$$

В результате проведенных вычислений осуществляется построение диаграммы интегральных вкладов ФЭ в показатель надежности функционирования ОСС для неоднородных ФЭ, однородных ФЭ и возможностных ФЭ (рис. 3).



Рисунок 3. Диаграмма критичности отказов ФЭ ОСС

Из диаграммы критичности отказов ФЭ ОСС видно, что наиболее критичными ФЭ являются элементы Системы электроснабжения СЭС (элементы 13 и 14), а также элементы Перемещения жидкого груза (элемент 2), Спецвентиляции (элемент 3), Сигнализации системы питания (элемент 16) и Главный двигатель (элемент 18).

Анализ полученных промежуточных результатов позволяет сделать вывод о том, что отказы ФЭ Системы перемещения жидкого груза (элемент 2), Спецвентиляции (элемент 3), Главный двигатель (элемент 18) и Сигнализации системы питания (элемент 16) существенно влияют на возникновение проектной аварии. Отказы ФЭ СЭС (элементы 13, 14) оказывают существенное влияние на возникновение запроектной аварии. Особое значение на локализацию запроектной аварии и перевод ее в проектную оказывают ФЭ Системы борьбы с пожарами СПЖ (элемент 4) и Канала измерения рабочих параметров (КИРП) (элемент 7).

Исследования, выполненные по данной тематике, проводились при финансовой поддержке РФФИ (гранты 10-07-00311-а, 11-08-01016-а, 11-08-00767-а, 12-06-00276-а, 12-07-00302-а), ОНИТ РАН (проект №2.11), Программы ESTLATRUS: проекты 1.2/ELRI-121/2011/13, 2.1/ELRI-184/2011/14.

Литература

1. **Охтилев М. Ю.** Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов / М. Ю. Охтилев, Б. В. Соколов, Р. М. Юсупов. – М.: Наука, 2006. – 410 с.
2. **Месарович М.** Общая теория систем: математические основы / М. Месарович, Я. Такахара. – М.: Мир, 1978. – 312 с.
3. Методы анализа и синтеза структур управляющих систем / **Б. Г. Волик, Б. Б. Буянов, Н. В. Лубков и др.**; под ред. Б. Г. Волик. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 296 с.
4. **Рябинин И. А.** Надежность и безопасность сложных систем / И.А. Рябинин. — СПб.: Политехника, 2000. – 248 с.

5. Применение общего логико-вероятностного метода для анализа технических, военных организационно-функциональных систем и вооруженного противоборства: монография, научное издание / **В. И. Поленин, И. А. Рябинин, С. К. Свирин, И. А. Гладкова**; под ред. А. С. Можаяева. – СПб.: СПб-региональное отделение РАЕН, 2011. – 416 с.
6. **Осипенко С. А.** Исследование безопасности сложных технических объектов / С. А. Осипенко, А. Н. Павлов // Известия Вузов. Приборостроение. – 2010. – том №53, №11. – С. 27–31.
7. **Копытов Е.** New methods of calculating the Genome of structure and the failure criticality of the complex objects' elements / E. A. Kopytov, A. N. Pavlov, V. A. Zelentsov // Transport and Telecommunication. – 2010. – Vol. 11. – № 4. – P. 4–13.