

*На правах рукописи*



Холодных Павел Владимирович

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ, МЕТОДЫ И  
КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ  
АНАЛИЗА И ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И ЖИВУЧЕСТИ  
СТРУКТУРНО-СЛОЖНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Специальность 05.13.18 – Математическое  
моделирование, численные методы и  
комплексы программ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2013 г.

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Научный руководитель: кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник  
Симаков Игорь Павлович

Официальные оппоненты: Ершов Геннадий Алексеевич,  
доктор технических наук, профессор,  
начальник управления главных инженеров проектов  
ОАО «Санкт-Петербургский научно-  
исследовательский и проектно-конструкторский  
институт «АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ»

Никонов Евгений Николаевич,  
кандидат технических наук, доцент,  
профессор ВУНЦ ВМФ  
«Военно-морская академия»

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки  
«Институт проблем транспорта  
им. Н.С. Соломенко» Российской академии наук

Защита состоится 16 мая 2013 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.229.10 при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 21, ауд. 121.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан «\_\_\_» апреля 2013 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Богач Наталья Владимировна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Диссертация посвящена разработке математических моделей и методов, предназначенных для анализа и обеспечения надежности и живучести структурно-сложных энергетических систем (ЭС), таких как энергоблоки атомных и тепловых электростанций и функциональные комплексы технических средств энергообеспечения судов (судовые ЭС). ЭС рассматриваемого класса представляют собой автоматизированные технические комплексы пространственно распределенных подсистем, взаимосвязанных потоками энергии, вещества и информации. Так, судовая ЭС включает в себя главную энергетическую установку, электроэнергетическую систему, систему судовой гидравлики, систему охлаждения судового оборудования, вспомогательные, обеспечивающие и управляющие системы. Функциональные связи между подсистемами реализуют замкнутые технологические контуры, обеспечивающие самоподдержание энергетических процессов в ЭС.

К рассматриваемым в работе ЭС как комплексам перечисленных выше подсистем предъявляются высокие требования к уровням надежности и живучести. Для удовлетворения этим требованиям в ЭС применяются различные виды избыточности (структурная, энергетическая), резервные агрегаты и каналы передачи ресурсов (энергии, вещества, информации), организованные совместно с основными агрегатами и каналами в сетевые структуры.

При создании сложных систем данного класса возникает ряд научно-технических задач, связанных с обеспечением высоких уровней их системной надежности и живучести, среди которых выделены: 1) задача научно-обоснованного синтеза (выбора) структуры ЭС (функциональной, топологической, организационной, технической); 2) задача принятия управляющих решений по реконфигурации структуры ЭС для восстановления ее работоспособности при произвольных комбинациях отказов компонентов. Оценка структуры ЭС должна производиться как по вероятностным показателям надежности, так и по детерминированным показателям отказоустойчивости и живучести.

Решение указанных задач требует анализа качества структурной организации ЭС и выявления влияния одиночных и кратных отказов элементов системы на общий уровень работоспособности ЭС. Одна из основных задач структурного анализа состоит в получении функции работоспособности системы (ФРС) – логической функции, в явном виде связывающей состояние работоспособности всей ЭС в целом с состояниями работоспособности ее элементов. ФРС является основой для расчета показателей надежности логико-вероятностными методами. Подобный анализ имеет комбинаторную сложность. Поэтому разработка эффективных математических моделей и методов анализа работоспособности, надежности и живучести структурно-сложных ЭС является крайне актуальной.

**Целью** диссертационной работы является разработка математических моделей, методов и программных средств, обеспечивающих решение задач анализа и оценки качества структурной организации ЭС по критериям надежности и живучести при проектировании и принятия оперативных решений по реконфигурации ее структуры для восстановления работоспособности при произвольных комбинациях отказов элементов при эксплуатации.

Для достижения поставленных целей были решены следующие **задачи**:

1. Разработана математическая модель работоспособности ЭС в форме алгебраической системы логических уравнений (СЛУ), описывающей структуру ЭС и связывающей в неявном виде состояние работоспособности энергетической системы в целом с состояниями работоспособности всех ее элементов. Предложенная модель основывается на структурно-логическом и структурно-функциональном подобии исследуемому объекту.
2. Разработан метод аналитического вывода логических функций работоспособности системы на основе решения алгебраической СЛУ.
3. Разработаны методы численного расчета предложенных в работе детерминированных показателей качества структурной организации ЭС, оценивающих уровень ее отказоустойчивости и живучести при отказах элементов любой кратности.
4. Разработаны алгоритмы принятия управляющих решений по реконфигурации структуры ЭС при произвольных комбинациях отказов (заранее не заданных и не исследованных), которые могут быть использованы при проектировании систем информационной поддержки персонала управления при принятии оперативных решений по восстановлению работоспособности ЭС.
5. Создан программный комплекс (ПК), предназначенный для анализа надежности и живучести ЭС и выработки решений по реконфигурации структуры ЭС.

**Объектом исследования** являются энергетические системы, которые с точки зрения теории надежности и теории живучести относятся к структурно-сложным.

**Предметом исследования** является надежность, живучесть и отказоустойчивость рассматриваемого класса ЭС.

**Методы исследования.** В работе использовались методы системного анализа, дискретная математика (теория множеств, булева алгебра, булевы функции), теория вероятностей, комбинаторный анализ, метод В. С. Левченкова решения систем логических уравнений и логико-вероятностный метод И. А. Рябина расчета показателей надежности.

**Основные научные положения**, выносимые на защиту:

1. Математическая модель работоспособности ЭС в форме алгебраической системы логических уравнений.

2. Метод аналитического вывода функций работоспособности системы на основе решения системы логических уравнений.
3. Методы численного расчета детерминированных показателей отказоустойчивости ЭС на основе функций работоспособности системы.
4. Численно-аналитический метод синтеза работоспособной конфигурации ЭС для восстановления ее функционирования при отказах элементов.

**Научная новизна** заключается в следующем: предложенные модели и методы позволяют описывать и анализировать структурно-сложные ЭС, содержащие кольцевые, магистральные, колесные, лестничные и др. структуры, замкнутые технологические контуры, а также средства информационного обмена между элементами управляющей системы.

**Практическая ценность работы.** Разработанные математические модели, методы и программные средства обеспечивают решение возникающих на уровне генерального конструктора проекта ЭС задач комплексирования в единое целое множества подсистем, разрабатываемых различными предприятиями:

1. Выявление «узких мест» в структуре ЭС с целью принятия технических решений по предотвращению создания систем, в которых одиночные или кратные отказы могут привести к невыполнению системой своего назначения или к авариям.
2. Проверка выполнимости детерминированных требований нормативно-технической документации и технических заданий к функционированию системы при т.н. максимальных проектных авариях, например, критерия единичного отказа и др.
3. Выполнение проектных расчетов вероятностных показателей надежности ЭС, а также оценка уровня ее живучести.
4. Синтез алгоритмов принятия решений по реконфигурации структуры ЭС при решении задач борьбы за живучесть при любых произвольных комбинациях отказов элементов, т.е. решение задачи: «какую собрать работоспособную структуру из оставшихся в строю элементов».

**Реализация результатов работы.** Результаты работы использовались в ООО «АЭС-Буран» для анализа структуры подсистем и оценки показателей безопасности АЭС. Результаты работы внедрены в учебный процесс кафедры «Системный анализ и управление» СПбГПУ для дисциплин «Проектирование информационно-управляющих систем» и «Теория надежности информационно-управляющих систем».

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались и обсуждались на XIV, XV и XVI Всероссийских научно-методических конференциях «Фундаментальные исследования и инновации в национальных исследовательских университетах» (СПб., 2010, 2011, 2012), XLIII международной научной конференции «Процессы управления и устойчивость» (СПб, 2012).

**Личный вклад автора.** Основные научные положения, алгоритмы и их программная реализация, содержащиеся в диссертационной работе, получены автором самостоятельно.

**Публикации.** Основные материалы по теме диссертации опубликованы в 12 научных статьях и докладах, среди которых 2 публикации в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 103 наименования, и приложения. Работа изложена на 159 страницах, содержит 34 рисунка, 8 таблиц.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, описаны основные современные подходы к решению проблемы анализа и повышения надежности, безопасности и живучести современных автоматизированных технических комплексов и очерчены их основные ограничения и недостатки. В частности, рассмотрены логико-вероятностные методы анализа надежности технических систем и методы координированных переключений для восстановления работоспособности судовых ЭС. На основе анализа определены цели и задачи настоящего исследования, отмечена его практическая ценность.

**В первой главе** приведен обзор математических моделей структуры технических систем и методов получения ФРС: метод деревьев отказов; методы, использующие графы и матрицы связности; методы аналитического вывода ФРС на основе решения систем логических уравнений и др. На примерах структурно-сложных систем показаны ограниченные возможности рассмотренных методов вывода ФРС для рассматриваемых в работе ЭС, характеризующихся наличием замкнутых технологических контуров и обратных связей.

**Во второй главе** разработана логико-математическая модель работоспособности ЭС и метод аналитического вывода ФРС. В модели учтены основные особенности ЭС: наличие замкнутых технологических контуров; наличие подсистем, использующих и обменивающихся энергией, веществом, информацией (далее – ресурсами) и имеющих сложную сетевую структуру; наличие элементов, которые для нормального функционирования требуют работоспособности элементов-потребителей ресурса.

Задача вывода ФРС заключается в определении булевой функции  $\varphi_F(\vec{x})$ , равной единице, если ЭС работоспособна (может функционировать), и нулю в противном случае. Здесь  $\vec{x} = (x_1, \dots, x_N; x_{1,2}, \dots, x_{N-1,N})$  - вектор булевых переменных состояния работоспособности элементов ЭС  $x_i$  и линий связей  $x_{i,j}$  между ними. Если  $x_i = 1$  ( $x_{i,j} = 1$ ), то  $i$ -й элемент (связь  $(i, j)$ ) работоспособен(на) и

неработоспособен(на) (находится в состоянии отказа) в противном случае. Для вывода ФРС требуется произвести анализ структуры ЭС и взаимосвязей между ее элементами.

Структура ЭС представляется в виде графа  $\langle E, L \rangle$ , где  $E = \{i\}_{i=1}^N$  - множество элементов,  $L = \{(i, j)\}$  - множество связей между элементами. Наличие связи  $(i, j) \in L$  означает, что существует непосредственный канал передачи ресурса  $\rho(i, j) \in R$  ( $R = \{\rho\}_{\rho=1}^{N_R}$  - множество видов ресурсов, используемых в ЭС, числом  $N_R$ ) от  $j$ -го элемента к  $i$ -у. Пример структурного графа ЭС приведен на рис. 1, где ресурс  $\rho = 1$  обозначает электроэнергию,  $\rho = 2$  - забортную воду,  $\rho = 3$  - пар и т.д.

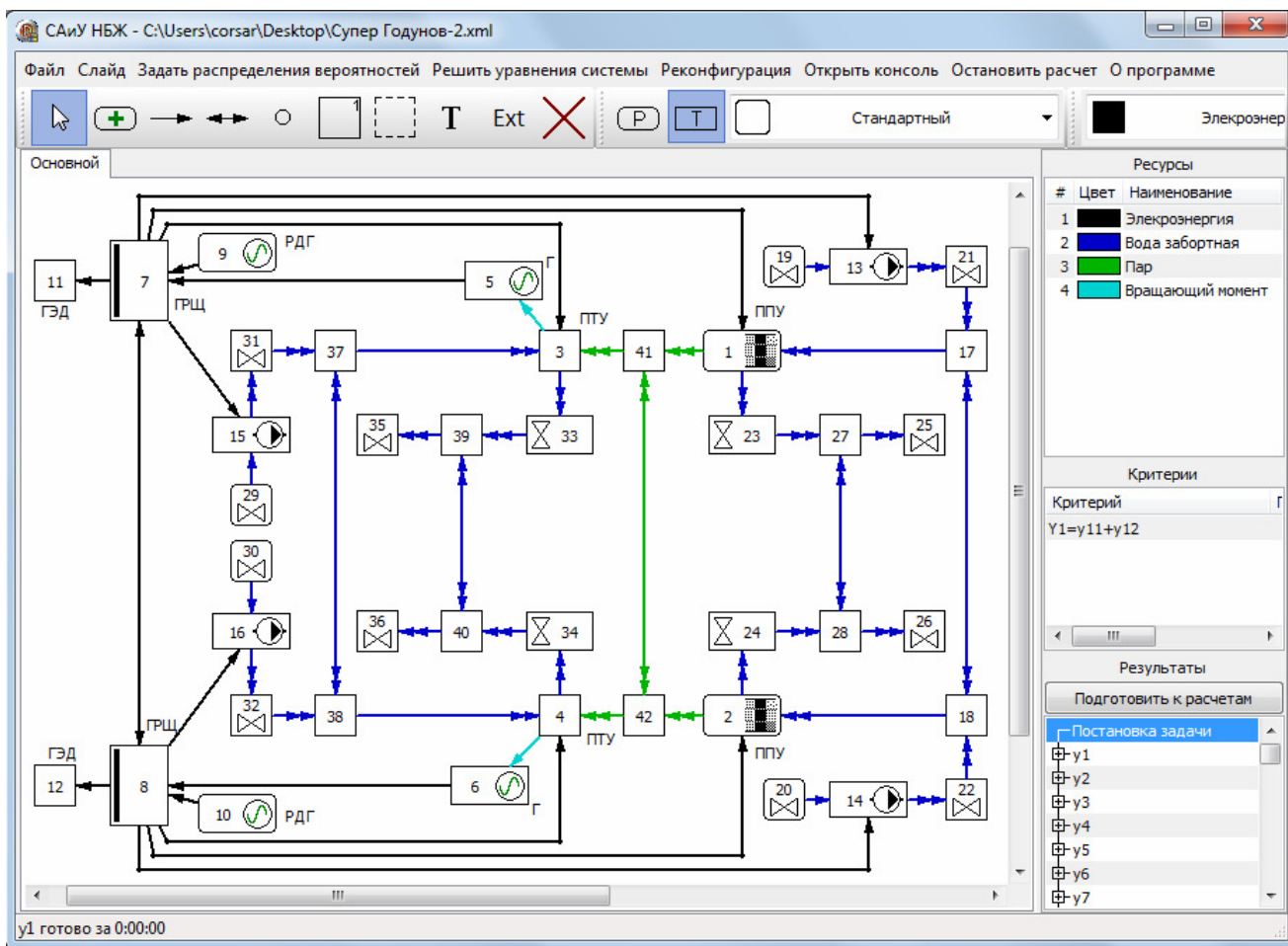


Рис. 1. Пример структуры ЭС судна, введенной в ПК «САиУ НБЖ».

В работе разработана модель работоспособности ЭС, связывающая между собой состояния работоспособности элементов и связей системы с возможностью функционирования отдельных элементов и всей ЭС в целом. Модель представляется в форме системы алгебраических логических уравнений

$$\begin{cases} y_i = \varphi_i(\vec{x}), & i \in E, \\ Y = F(y_i, i \in E_{\text{вых}}), \end{cases} \quad (1)$$

где  $y_i \in \{0,1\}$  и  $Y \in \{0,1\}$  - булевы переменные состояния соответственно  $i$ -го элемента и всей ЭС в целом, характеризующие возможность их нормального функционирования (при  $y_i / Y = 1$ );  $E_{\text{вых}} \subset E$  - подмножество выходных элементов ЭС;  $F \in \{0,1\}$  - булева функция, задающая критерий функционирования ЭС; булевы функции  $\varphi_i(\vec{x}) \in \{0,1\}$  задаются в предикатной форме:

*Утверждение 1.* Функция  $\varphi_i(\vec{x}) = 1 \Leftrightarrow$  существует подграф структурного графа  $K = \langle E^K, L^K \rangle$  ( $E^K \subset E$ ,  $L^K \subset L$ ), состоящий из работоспособных элементов и связей и включающий  $i$ -й элемент:  $i \in E^K$ ,  $E^K \subset \{i \in E : x_i = 1\}$ ,  $L^K \subset \{(i, j) \in L : x_{i,j} = 1\}$ , удовлетворяющий требованиям:

а) для любого элемента  $i \in E^K$  существует такой  $l_i \in \{1, \dots, n(i)\}$ , что  $L_i^{l_i} \subset L^K$ .

б) не существует такой пары связей  $\{(i, j), (j, i)\} \subset L^K$ , что  $C(i, j) = C(j, i) = J$ .

в) для любой связи  $(i, j) \in L^K$  существует такая последовательность  $\{(i_k, j_k)\}_{k=1}^m \subset L^K$ , что  $(i_1, j_1) = (i, j)$  и  $C(j_m) = P$ , и  $j_k = i_{k+1}$  для  $k = 1, \dots, m-1$ .

В условии а) подмножество связей  $L_i^{l_i} \subset L$  обозначает один из минимальных наборов связей (МНС)  $i$ -го элемента как достаточного, несократимого набора связей со смежными элементами, обеспечивающего функционирование  $i$ -го элемента. Каждый элемент для своего функционирования должен быть обеспечен всеми видами потребляемых им ресурсов от функционирующих элементов-поставщиков ближайшего окружения. Для корректного учета особенностей ЭС введено понятие взаимной связи. Подмножество взаимных связей обозначается как  $L_M \subset L$ . Если связь  $(i, j) \in L_M$ , то  $j$ -й элемент должен передать производимый им ресурс  $\rho(i, j)$  хотя бы одному из потребителей. На рис. 1 взаимные связи обозначены линией с двойной стрелкой.

Если элемент потребляет ресурс  $r \in R$ , то в МНС  $L_i^{l_i}$  должна входить одна связь  $(i, j) \in L : \rho(i, j) = r$ . Если элемент «нуждается» в использовании производимого им ресурса  $r' \in R$ , то в МНС должна входить одна взаимная связь  $(k, i) \in L_M : \rho(k, i) = r'$ . Перебор всех подобных сочетаний связей позволяет получить множество всех МНС  $i$ -го элемента  $\hat{L}_i = \{L_i^l\}_{l=1}^{n(i)}$  количеством  $n(i)$ .

В условиях б) и в) параметры  $C(i) \in \{P, T\}$  и  $C(i, j) \in \{N, J\}$  обозначают соответственно класс  $i$ -го элемента и связи  $(i, j)$ . Классификация элементов и связей приведена в табл. 1. На рис. 1. Р-элементами являются элементы 1, 2, 9, 10, 19, 20, 29, 30; управляемые J-связи изображены двунаправленными стрелками.



Таблица 1

| Термин    | Описание свойств элементов и связей  |
|-----------|--|
| Р-элемент | Элемент, содержащий источник вещества или энергии  |
| Т-элемент | Элемент, преобразующий или передающий ресурсы  |
| Н-связь   | Связь с фиксированным направлением движения ресурса  |
| Ј-связь   | Управляемая связь, ресурс по которой может передаваться между элементами в любом из двух направлений, но не в обоих одновременно |

Для подграфа  $K = \langle E^K, L^K \rangle$ , обладающего свойствами а), б), в), в работе принят термин «*работоспособная конфигурация*» (РК). Условия а), б), в) отражают логические условия физической реализуемости технологических процессов в ЭС. Условие а) означает, что для каждого элемента РК, в конфигурацию должны быть включены все связи хотя бы одного его МНС. Условие б) отражает требование: в РК ресурс в управляемых связях не может передаваться в обоих направлениях одновременно. Условие в) определяет, что все ресурсы, передаваемые между элементами РК, должны быть результатом транспортировки или преобразования ресурсов, создаваемых Р-элементами с указанием пути. Принимается допущение, что все Р-элементы способны обеспечить производимыми ими ресурсом одновременно всех возможных потребителей.

Утверждение 1 задает функции  $\varphi_i(\vec{x})$  в неявном виде. Для определения функций  $\varphi_i(\vec{x})$  в явном виде требуется выполнить анализ всех возможных подграфов структурного графа ЭС и выбрать из них подграфы, являющиеся работоспособными конфигурациями. Тогда ФРС определяется из соотношения  $\varphi_F(\vec{x}) = F(\varphi_i(\vec{x}), i \in E_{\text{вых}})$ . С целью ухода от процедуры «перебора» предлагается метод аналитического вывода ФРС на основе решения специальной алгебраической системы логических уравнений (ССЛУ), неявно задающей с помощью операций конъюнкции и дизъюнкции связь между переменными состояния работоспособности элементов и связей и переменными состояния, характеризующими возможность функционирования элементов:

$$y_i = x_i f_i \left( x_{i,j} H_{i,j}^{C(j),C(i,j)} y_j, j \in N_i \subset E; x_{k,j} H_{k,i}^{C(i),C(k,i)} y_k, k \in M_i \subset E \right), i = 1, \dots, N, \quad (2)$$

где  $N_i$  - множество элементов ближайшего окружения  $i$ -го элемента по его входам;  $M_i$  - множество элементов ближайшего окружения  $i$ -го элемента по его выходам, соответствующим взаимным связям;  $H_{i,j}^{C(j),C(i,j)}$  - бинарные индикаторы («маркеры») связей, характеризующие класс элемента-поставщика  $C(j) \in \{P, T\}$  и класс связи  $C(i, j) \in \{N, J\}$ ;  $f_i$  - логические функции в базисе операций конъюнкции и дизъюнкции от «комплексов» (конъюнктов)  $x_{i,j} H_{i,j}^{C(j),C(i,j)} y_j$  и  $x_{k,j} H_{k,i}^{C(i),C(k,i)} y_k$ , задающие условия обеспечения нормального функционирования  $i$ -го элемента от

функционирования смежных элементов. Функции  $f_i$  могут быть записаны на основе всех МНС  $i$ -го элемента:

$$f_i = \bigvee_{l=1}^{n(i)} \left( \left( \bigwedge_{(i,j) \in L_l^i} x_{i,j} H_{i,j}^{C(j),C(i,j)} y_j \right) \wedge \left( \bigwedge_{(k,i) \in L_l^i \cap L_M} x_{k,i} H_{k,i}^{C(i),C(k,i)} y_k \right) \right). \quad (3)$$

$$\text{Для переменных } H_{i,j}^{C(j),C(i,j)} \text{ вводится свойство: } H_{j,k}^{C(j),J} \wedge H_{k,j}^{C(k),J} = 0. \quad (4)$$

В таблице 2 приведены примеры уравнений из ССЛУ, записанной для ЭС судна, изображенной на рис. 1.

Таблица 2

|  |   |
|--|---|
| $y_1 = x_1 x_{1,7} H_{1,7}^{T,N} y_7 x_{1,17} H_{1,17}^{T,N} y_{17} x_{23,1} H_{23,1}^{T,N} y_{23} x_{41,1} H_{41,1}^{T,N} y_{41};$                                  | $y_5 = x_5 x_{5,3} H_{5,3}^{T,N};$  |
| $y_3 = x_3 x_{3,7} H_{3,7}^{T,N} y_7 x_{3,37} H_{3,37}^{T,N} y_{37} x_{33,3} H_{33,3}^{T,N} y_{33} x_{3,41} H_{3,41}^{T,N} y_{41};$                                  | $y_9 = x_9;$  |
| $y_7 = x_7 (x_{7,5} H_{7,5}^{T,N} y_5 \vee x_{7,8} H_{7,8}^{T,J} y_8 \vee x_{7,9} H_{7,9}^{P,N} y_9);$   | $y_{19} = x_{19};$  |
| $y_{13} = x_{13} x_{13,7} H_{13,7}^{T,N} y_7 x_{13,19} H_{13,19}^{P,N} y_{19} x_{21,13} H_{21,13}^{T,N} y_{21};$   | $y_{25} = x_{25} x_{25,27} H_{25,27}^{N,T} y_{27};$                             |
| $y_{21} = x_{21} x_{21,13} H_{21,13}^{T,N} y_{13} x_{17,21} H_{17,21}^{T,N} y_{17};$   | $y_{23} = x_{23} x_{23,1} H_{23,1}^{P,N} y_1 x_{27,23} H_{27,23}^{T,N} y_{27};$ |
| $y_{17} = x_{17} (x_{17,21} H_{17,21}^{T,N} y_{21} \vee x_{17,18} H_{17,18}^{T,J} y_{18}) (x_{1,17} H_{1,17}^{T,N} y_1 \vee x_{17,18} H_{18,17}^{T,J} y_{18});$      |   |
| $y_{27} = x_{27} (x_{27,23} H_{27,23}^{T,N} y_{23} \vee x_{27,28} H_{27,28}^{T,J} y_{28}) (x_{25,27} H_{25,27}^{T,N} y_{25} \vee x_{27,28} H_{28,27}^{T,J} y_{28});$ |   |
| $y_{41} = x_{41} (x_{41,1} H_{41,1}^{P,N} y_1 \vee x_{41,42} H_{41,42}^{T,J} y_{42}) (x_{3,41} H_{3,41}^{T,N} y_3 \vee x_{41,42} H_{42,41}^{T,J} y_{42}).$           |   |

Метод определения ФРС состоит из шагов, приведенных ниже, и является аналогом метода последовательного исключения неизвестных (Гаусса) для логических уравнений.

Шаги  $m = 1, \dots, N - 1$ . Прямой ход метода:

$$f_i^0(\vec{x}, \vec{H}, y_1, \dots, y_{i-1}, y_{i+1}, \dots, y_N) = x_i \cdot f_i, \quad i = 1, \dots, N; \quad (5)$$

$$f_i^m(\vec{x}, \vec{H}, y_{m+1}, \dots, y_{i-1}, y_{i+1}, \dots, y_N) = f_i^{m-1}(y_m = f_m^{m-1}) \Big|_{y_i=1}, \quad i = m + 1, \dots, N. \quad (6)$$

Шаг  $N$ . Обратная подстановка:

$$g_i(\vec{x}, \vec{H}) = f_i^{i-1}(y_{i+1} = g_{i+1}, \dots, y_N = g_N), \quad i = 1, \dots, N. \quad (7)$$

Под  $\vec{H}$  в (5-7) понимается вектор всех переменных  $H_{i,j}^{C(j),C(i,j)}$  в ССЛУ (2).

Совокупность функций  $(g_i)_{i=1}^N$  является частным решением ССЛУ относительно переменных  $y_i$  и служит опорным решением для получения набора функций  $\varphi_i$ , определяемых на последнем шаге метода соотношением

$$\varphi_i(\vec{x}) = \bigvee_k (X_i^k \wedge \Xi(H_i^k)), \quad (8)$$

где  $g_i(\vec{x}, \vec{H}) = \bigvee_k (X_i^k \wedge H_i^k)$  - представление функций  $g_i$  в виде минимальной ДНФ (МДНФ);  $X_i^k$  и  $H_i^k$  - соответственно конъюнкции переменных работоспособности и переменных-«маркеров» в  $k$ -м конъюнкте МДНФ. Для конъюнкции переменных-

«маркеров»  $H = \bigwedge_{k=1}^S H_{i_k, j_k}^{c'_k, c''_k}$  оператор  $\Xi(H)$  определяется соотношением:

$$\Xi(H) = \begin{cases} 1, \text{ если } \forall k = 1, \dots, s, \exists \{k_q\}_{q=1}^m : k_1 = k \text{ и } c'_{k_m} = P \text{ и} \\ j_{k_q} = i_{k_{q+1}} \text{ для } q = 1, \dots, m-1, \\ 0 \text{ в противном случае.} \end{cases} \quad (9)$$

$$\text{ФРС определяется соотношением } \varphi_F(\vec{x}) = F(\varphi_i(\vec{x}), i \in E_{\text{вых}}). \quad (10)$$

Предложенный метод основан на модели (1). Ограничения на функции  $\varphi_i$  учитываются следующим образом: условие а) вносится в ССЛУ (2) с помощью функций  $f_i$  (3); условие б) отражается в свойстве переменных  $H_{i,j}^{C(j), C(i,j)}$  (4); условие в) реализуется в формулах (8) и (9). Существование опорного частного решения ССЛУ  $(g_i)_{i=1}^N$  обеспечивается тем, что функции  $f_i$  задаются с использованием только булевых операций конъюнкции и дизъюнкции. Каждый конъюнкт функции  $g_i$  в МДНФ соответствует либо минимальной РК (МРК) (подграфу, удовлетворяющему свойствам РК, но исключение любого элемента или связи из которого приводит к потере этих свойств), либо неработоспособной конфигурации, не удовлетворяющей свойству в). Формулы (8) и (9) позволяют исключить последние из функции  $\varphi_i$ . В результате функции  $\varphi_i$  содержат конъюнкты, соответствующие всем возможным МРК, включающим  $i$ -й элемент.

Для критерия функционирования  $F = y_5 \vee y_6$  (работа хотя бы одного турбогенератора) ФРС  $\varphi_F(\vec{x})$  в МДНФ, полученная для ЭС, изображенной на рис. 1, содержит 186 конъюнктов, которые соответствуют 186 МРК.

Для ЭС, содержащих замкнутые технологические контуры и управляемые связи, ССЛУ имеет множество решений, т.е. несколько наборов функций  $(g_i)_{i=1}^N$ . Но только один набор имеет физический смысл и адекватно описывает множество работоспособных конфигураций ЭС. Новизна метода вывода ФРС заключается в том, что он позволяет произвести направленный вывод корректного набора функций  $\varphi_i$ , удовлетворяющих утверждению 1, исключая необходимость в анализе большого количества частных решений ССЛУ.

**В третьей главе** представлены формулы численного расчета детерминированных показателей отказоустойчивости ЭС. Эти показатели позволяют оценить живучесть ЭС, ее способность продолжать функционирование при произвольных комбинациях отказавших элементов. Оценка качества структуры производится не по вероятности, а детерминировано на основе анализа множества работоспособных состояний ЭС, определяемого из уравнения  $\varphi_F(\vec{x}) = 1$ .

Расчет показателей ведется на основе представлений ФРС  $\varphi_F(\bar{x})$  в МДНФ

$$\varphi_F = \bigvee_{j=1}^t X_j, \text{ ОДНФ } \varphi_F = \bigvee_{j=1}^s \tilde{X}_j \text{ и логического дополнения ФРС в МДНФ } \overline{\varphi_F} = \bigvee_{l=1}^q \bar{X}_l.$$

Показатели и формулы их численного расчета приведены в таблице 3, где  $n = \dim(\bar{x})$ ,  $r(X)$  и  $m(X)$  - соответственно ранг и количество отрицаний переменных состояний работоспособности элементов и связей в конъюнкте  $X$ .

Таблица 3

| Формула показателя   | Описание показателя   |
|--|---|
| $V = \sum_{j=1}^s \left(\frac{1}{2}\right)^{r(\tilde{X}_j)}$   | Отношение числа работоспособных состояний ЭС к общему их числу, равному $2^n$ .   |
| $G_k = \sum_{j \in J_k} C_{n-r(\tilde{X}_j)}^{k-m(\tilde{X}_j)} / C_n^k, k = 1, \dots, n,$<br>$J_k = \{j : m(\tilde{X}_j) \leq k \text{ и } r(\tilde{X}_j) - m(\tilde{X}_j) \leq n - k\}$                                    | Доля работоспособных состояний ЭС среди состояний с отказами $k$ -й кратности. Если $G_k = a$ , то ЭС держит без потери работоспособности 100а% всех возможных отказов $k$ -й кратности.  |
| $v_i = \frac{1}{V} \left( \sum_{j: \tilde{x}_i \in \tilde{X}_j} \left(\frac{1}{2}\right)^{r(\tilde{X}_j)} - \sum_{j: \tilde{x}_i \notin \tilde{X}_j} \left(\frac{1}{2}\right)^{r(\tilde{X}_j)} \right)$<br>$i = 1, \dots, N$ | Коэффициент сокращения доли работоспособных состояний ЭС при отказе $i$ -го элемента. Определяет значимость $i$ -го элемента в отказоустойчивости ЭС по шкале от нуля (не влияет) до единицы (отказ элемента приводит к отказу ЭС). |
| $d = \min_{l=1, \dots, q} r(\bar{X}_l) - 1$  | Максимальное число отказов произвольных элементов в ЭС, которые в любом сочетании не приведут к потере работоспособности всего ЭС.  |
| $m = n - \min_{j=1, \dots, t} r(X_j)$  | Предельная кратность отказа, который теоретически может выдержать ЭС без потери работоспособности.  |
| $d' = d + G_{d+1}$   | Комплексный показатель, одновременно оценивающий и $d$ -отказоустойчивость ЭС, и ее «сопротивляемость» к отказом «закритичной» $(d+1)$ -й кратности.  |

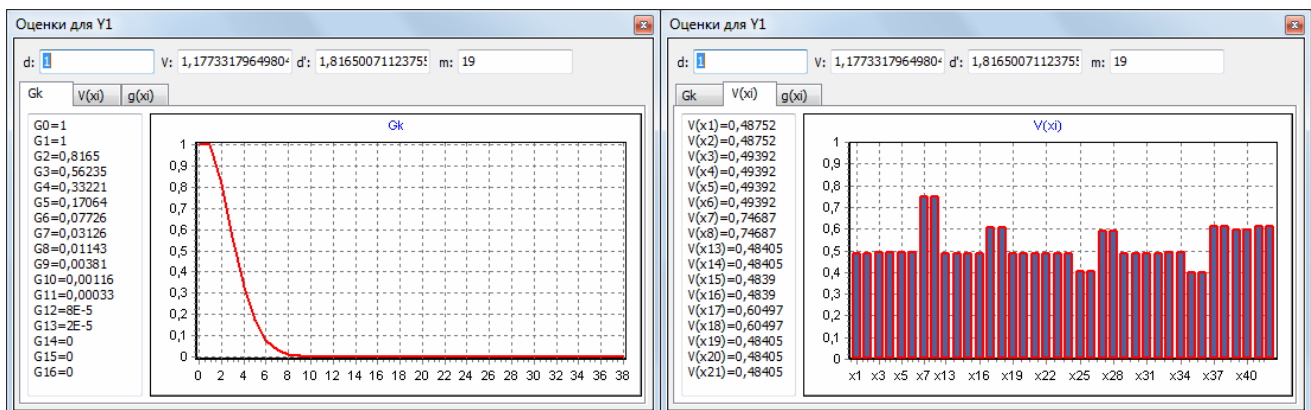


Рис. 2. График функции отказоустойчивости  $G_k$  от кратности отказов  $k$  (слева). Диаграмма значимостей  $v_i$  всех элементов ЭС (справа).

Для ЭС судна, изображенной на рис. 1, для критерия  $F = y_5 \vee y_6$  (работа хотя бы одного турбогенератора) показатели будут равны:  $V = 1,177 \cdot 10^{-5}$ ,  $d = 1$ ,  $m = 19$ ,  $d' = 1,816$ . На рис. 2. представлены графики показателей  $G_k$  и  $v_i$ .

**В четвертой главе** представлен метод синтеза работоспособной конфигурации, восстанавливающей функционирование ЭС после отказа части элементов и связей. Метод работает на основе ФРС в виде МДНФ  $\varphi_F(\vec{x}) = \sum_k X_k^F(\vec{x})$ , где  $X_k^F(\vec{x})$  -  $k$ -й конъюнкт МДНФ. Каждый конъюнкт  $X_k^F(\vec{x})$  соответствует одной МРК, обеспечивающей функционирование ЭС. Полагается, что предварительно конъюнкты ФРС  $X_k^F(\vec{x})$  упорядочены так, что меньшим индексом  $k$  обладают те конъюнкты, которые соответствуют более предпочтительным МРК, например, по критериям минимума резервных элементов и связей, эффективности и надежности.

Состояние ЭС задается двумя векторами:  $\vec{x}' = (x'_1, \dots, x'_N, x'_{1,2}, \dots, x'_{N-1,N})$  и  $\vec{x}'' = (x''_1, \dots, x''_N, x''_{1,2}, \dots, x''_{N-1,N})$ . Вектор  $\vec{x}'$  задает состав элементов и связей, задействованных (включенных и работающих) в текущей конфигурации ( $x'_i, x'_{i,j} = 1$ ) и не задействованных ( $x'_i, x'_{i,j} = 0$ ). Вектор  $\vec{x}''$  определяет работоспособность элементов и связей: переменные состояния  $x''_i, x''_{i,j}$  равны единице для работоспособных элементов и связей и нулю для отказавших.

Определим вектор  $\vec{x}''' = (x'''_1, \dots, x'''_N, x'''_{1,2}, \dots, x'''_{N-1,N})$  следующим образом:  $x'''_i = x'_i \wedge x''_i$ ,  $x'''_{i,j} = x'_{i,j} \wedge x''_{i,j}$ . В данном векторе равны единице переменные состояния элементов и связей, входящих в текущую конфигурацию ЭС и сохранивших работоспособность. Если ФРС  $\varphi_F(\vec{x}''') = 0$ , то ЭС не может функционировать в текущей конфигурации. Но если ФРС  $\varphi_F(\vec{x}''') = 1$ , то есть возможность выбрать новую работоспособную конфигурацию. Множество номеров МРК, доступных в ЭС с отказавшими элементами и связями, определяется как  $K^* = \{k : X_k^F(\vec{x}''') = 1\}$ . За новую рабочую конфигурацию принимается МРК, соответствующая конъюнкту с наименьшим номером  $k^* = \min K^*$ . Вектор  $\vec{x}^* = (x^*_1, \dots, x^*_N, x^*_{1,2}, \dots, x^*_{N-1,N})$  задает какие элементы и связи должны быть включены в работу, а какие выведены, и определяется следующим образом: переменная состояния  $x^*_i = 1$  ( $x^*_{i,j} = 1$ ), если она входит в конъюнкт  $X_{k^*}^F$ , и равна нулю в противном случае.

Преимуществами предложенного метода является простота его программной реализации, а также то, что выработка приемлемой рекомендации осуществляется до последней оставшейся работоспособной конфигурации ЭС.

В пятой главе представлен созданный автором программный комплекс «Структурный анализ и управление надежностью, безопасностью и живучестью» (ПК «САиУ НБЖ»), предназначенный для анализа структуры ЭС по критериям надежности и живучести, а также принятия решений по реконфигурации структуры ЭС при произвольных комбинация отказавших элементов. ПК позволяет решать следующие задачи:

1. С помощью визуальных средств задавать структуру ЭС (рис. 1) и задавать логические критерии функционирования  $F_j(y_1, \dots, y_N)$ .
2. Автоматически определять МНС элементов и синтезировать ССЛУ (2).
3. Производить вывод ФРС объекта по заданным критериям функционирования, определять и визуализировать множества МРК, а также т.н. минимальных сечений отказов – минимальных совокупностей элементов и связей, отказ которых приводит к полной неработоспособности всей ЭС.
4. Задавать характеристики надежности элементов и связей и производить расчет совокупности показателей безотказности невозстанавливаемой системы: вероятность безотказной работы, плотность вероятности наработки до отказа, интенсивность отказов, средняя наработка до отказа, средняя остаточная наработка до отказа (см. рис. 3). Для расчета показателей применяется логико-вероятностный метод расчета показателей надежности.
5. Производить расчет совокупности детерминированных показателей отказоустойчивости (рис. 2), оценивающих живучесть ЭС.
6. Задавать текущую рабочую конфигурацию ЭС и подмножество отказавших элементов и связей. На основе этой информации ПК отображает на структурной схеме множество элементов, потерявших возможность нормального функционирования, и рекомендуемую новую работоспособную конфигурацию.

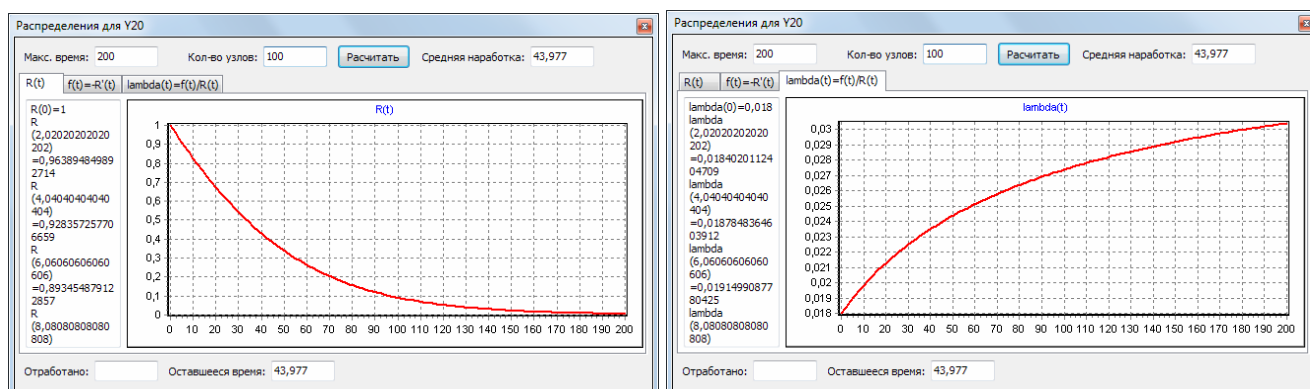


Рис. 3. Представление результатов расчета показателей надежности в ПК «САиУ НБЖ»: график вероятности безотказной работы (слева), график интенсивности отказов (справа).

В этой же главе приведены примеры использования программного комплекса для решения практических задач:

1. Сравнение вариантов схем первичной сети электроэнергетической системы судна с кольцевой и лестничной структурами.
2. Сравнение вариантов топологической структуры укрупненной энергосистемы гипотетического судна по критериям живучести.
3. Применение ПК для выработки решений по реконфигурации структур при отказах элементов.
4. Применение ПК для анализа структуры ЭС судна, состоящего из четырех взаимодействующих подсистем: электроэнергетической, охлаждения оборудования, гидравлической и управления – по критерию обеспечения 6 групп потребителей, находящихся в разных отсеках, необходимыми видами ресурсов.

**В заключении** сформулированы результаты работы.

**Заключение по результатам проведенных исследований:**

1. Разработана математическая модель работоспособности ЭС в форме системы логических уравнений, связывающей между собой логические переменные состояния работоспособности всех элементов и связей системы с работоспособностью ЭС в целом. Модель учитывает особенности структур рассматриваемого класса ЭС и логические условия физической реализуемости технологических процессов.
2. Разработан метод аналитического вывода ФРС на основе решения СЛУ, исключающий необходимость в переборе частных решений СЛУ или преобразовании технологических контуров в нециклические структуры - процедурах, используемых при применении других методов вывода ФРС. Также разработан формальный метод автоматического синтеза СЛУ.
3. Разработаны численные методы расчета детерминированных показателей качества структурной организации, оценивающих уровень отказоустойчивости ЭС, а также «важность» отдельных элементов в составе структуры при обеспечении заданного уровня надежности и живучести системы.
4. Разработан математический метод и алгоритм принятия решений по реконфигурации структуры ЭС для восстановления ее работоспособности при заранее не заданных комбинациях отказов элементов.
5. Создан комплекс программ для выполнения структурного анализа надежности и живучести и принятия оперативных решений по реконфигурации структуры ЭС.

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

**Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:**

1. Холодных, П. В. Логико-математическая модель структурно-сложной технической системы и ее применение [Текст] / П. В. Холодных // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2011. – №2. – С. 151-156.
2. Холодных, П. В. Метод выработки решений по реконфигурации структурно-сложной системы для восстановления ее работоспособности при произвольной комбинации отказавших элементов

[Текст] / П. В. Холодных // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2013. – №2. (В печати).

### **Публикации в других изданиях:**

3. Холодных, П. В. Формализованный метод определения кратчайших путей и минимальных сечений для объективной оценки надежности и живучести структурно-сложных систем [Текст] / П. В. Холодных // Материалы лучших докладов Всероссийской межвузовской научной конференции студентов и аспирантов (24-29 ноября 2008 г.). – СПб.: Изд. СПбГПУ, 2009. – С. 14-17.
4. Холодных, П. В. Многоцелевой программный комплекс для оценки надежности и безопасности крупномасштабных технических систем по детерминированным и вероятностным показателям [Текст] / П. В. Холодных, О. Ю. Лавриченко // Материалы Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов (26.11 – 01.12. 2009 г.). Часть V. - СПб.: Изд. СПбГПУ, 2009. – С. 46-48.
5. Холодных, П. В. Методы расчета показателей надежности и безопасности технических систем с элементами, имеющими два вида отказов [Текст] / П.В. Холодных // Материалы Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов (26.11 – 01.12. 2009 г.). Часть V. - СПб.: Изд. СПбГПУ, 2009. – С. 48-50.
6. Холодных, П. В. Математические методы и программные средства диагностирования и выработки решений по реконфигурации структур крупномасштабных систем при заранее непредсказуемых комбинациях отказов элементов [Текст] / П. В. Холодных // Материалы Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов (26.11 – 01.12. 2009 г.). Часть V. - СПб.: Изд. СПбГПУ, 2009. – С. 50-52.
7. Холодных, П. В. Математические модели, формализованные методы и программные средства объективной оценки надежности и безопасности структурно-сложных технических систем [Текст] / П. В. Холодных, И. П. Симаков // В сборнике научных трудов «Вычислительные, измерительные и управляющие системы». – СПб.: Изд-во СПбГПУ. 2009. – С. 130-139.
8. Холодных, П. В. Многоцелевой программный комплекс для оценки надежности и безопасности крупномасштабных технических систем по детерминированным и вероятностным показателям [Текст] / П. В. Холодных, И. П. Симаков // Фундаментальные исследования и инновации в национальных исследовательских университетах: Материалы XIV Всероссийской конференции. Санкт-Петербург. Том 1. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. С 217-218.
9. Холодных, П. В. Построение корректной логико-математической модели структурно-сложной системы [Текст] / П.В. Холодных // Фундаментальные исследования и инновации в национальных исследовательских университетах: Материалы XV Всероссийской конференции. Санкт-Петербург. Том 2. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. С 74-75.
10. Холодных, П. В. Многоцелевой программный комплекс структурного анализа и управления надежностью и безопасностью автоматизированных технических комплексов [Текст] / П. В. Холодных, И. П. Симаков // Фундаментальные исследования и инновации в национальных исследовательских университетах: Материалы Всероссийской научно-методической конференции. Санкт-Петербург. Том 2. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. С. 117-121.
11. Холодных, П. В. Корректная модель структуры сложных технических комплексов в форме системы логических уравнений и ее применение [Текст] / П. В. Холодных // Фундаментальные исследования и инновации в национальных исследовательских университетах: Материалы Всероссийской научно-методической конференции. Санкт-Петербург. Том 2. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. С. 135-140.
12. Холодных, П. В. Уточненная модель структуры сложных технических комплексов в форме системы логических уравнений и ее применение [Текст] / П. В. Холодных // Процессы управления и устойчивость: Труды 43-й международной научной конференции аспирантов и студентов / Под ред. А. С. Ерёмина, Н. В. Смирнова. СПб.: Издат. Дом С.-Петерб. ун-та, 2012. С. 67-72.