

УДК 004.052.2-3:004.942:006.015.7-8

П.В. Холодных
Санкт-Петербург, Россия

МЕТОД ВЫРАБОТКИ РЕШЕНИЙ ПО РЕКОНФИГУРАЦИИ СТРУКТУРНО-СЛОЖНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЕЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ПРИ ПРОИЗВОЛЬНОЙ КОМБИНАЦИИ ОТКАЗАВШИХ ЭЛЕМЕНТОВ

P.V. Kholodnykh
St.-Petersburg, Russia

METHOD OF RECONFIGURATION OF STRUCTURALLY COMPLEX SYSTEM FOR THE RESTORATION OF AVAILABILITY AT A RANDOM COMBINATION OF FAILED ELEMENTS

Сформулирован и предложен новый метод решения задачи выработки управляющих решений по реконфигурации структурно-сложной системы с целью восстановления ее работоспособности при произвольной комбинации отказавших элементов, что имеет большое значение для обеспечения надежности, живучести и безопасности автоматизированных технических комплексов при аварийных повреждениях.

СТРУКТУРНО-СЛОЖНАЯ СИСТЕМА. РАБОТОСПОСОБНОСТЬ. ЖИВУЧЕСТЬ. РЕКОНФИГУРАЦИЯ. КООРДИНИРОВАННЫЕ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ. УПРАВЛЕНИЕ.

The problem of the development of control decisions on reconfiguration of structurally complex systems with a purpose of restoration of its working state at a random combination of failed elements is described in this article. A new method of solution of this problem is proposed, which has great importance for achieving reliability, survivability and safety of automated technical complexes on emergency damages.

STRUCTURALLY COMPLEX SYSTEM. AVAILABILITY. SURVIVABILITY. RECONFIGURATION. COHERENT SWITCHES. CONTROL.

Автоматизация процессов обработки информации и управления остается одним из важнейших направлений кардинального повышения эффективности ответственных и потенциально опасных автоматизированных технических комплексов (АТК), а также обеспечения системной надежности, живучести, безаварийности и безопасности их функционирования. Несмотря на существенные успехи в практике комплексной автоматизации технических объектов и технологических процессов, в т. ч. в создании и внедрении таких крупных управляющих систем, как, например, комплексные системы управления техническими средствами судов, дальнейшее развитие и совершенствование управляющих систем сдерживается нерешенностью в теории управления ряда задач алгоритмизации процессов управления в нестандартных (нештатных),

заранее непредсказуемых аварийных ситуациях и аномальных аварийных режимах [1].

Современные высокоразвитые системы управления многоагрегатными техническими комплексами в силу их специфических особенностей включают в свой состав кроме традиционных систем автоматического регулирования функциональные подсистемы аварийной защиты и противоаварийного управления, в которых закладываются «жесткие» алгоритмы (типа «стимул – реакция») на ограниченное число аварийных ситуаций. Это, как правило, одиночные нарушения в работе оборудования, требующие для предотвращения поломки агрегатов и механизмов срабатывания локальных защит, локализации аварийных ситуаций с переводом объекта в безопасный режим (безопасное состояние) с возможно пониженным уровнем работоспособности (эффективности), вплоть

до временного вывода АТК (например, ядерной энергетической установки) из действия. В экстраординарных ситуациях при воздействии на АТК внешних разрушающих воздействий различной природы (пожары, затопления, ударные сотрясения и др.) возникают множественные отказы в различных частях комплекса и соответственно нестандартные (нештатные) аварийные ситуации, на которые заложенные в традиционные системы управления «жесткие» алгоритмы не рассчитаны. В этих случаях можно говорить об «алгоритмических отказах» систем управления (даже если аппаратура системы и не испытала повреждений), которые могут вызвать непредсказуемые, иногда катастрофические последствия.

Подсистемы аварийной защиты и противоаварийного управления согласно [2], реализуют контуры т. н. *структурного управления* (рис. 1), включая контур реконфигурации структуры АТК, который решает задачу «как собрать работоспособную структуру АТК» из оставшихся после аварии в строю элементов.

Разработка «жестких» алгоритмов для контуров структурного управления, рассчитанных не только на одиночные, но и на множественные нарушения в работе АТК (двух-, трех- и n -кратные отказы) принципиально не разрешима для систем с произвольной, не сводящейся к регулярной (последовательно-параллельной) структурой связи между компонентами в силу переборного

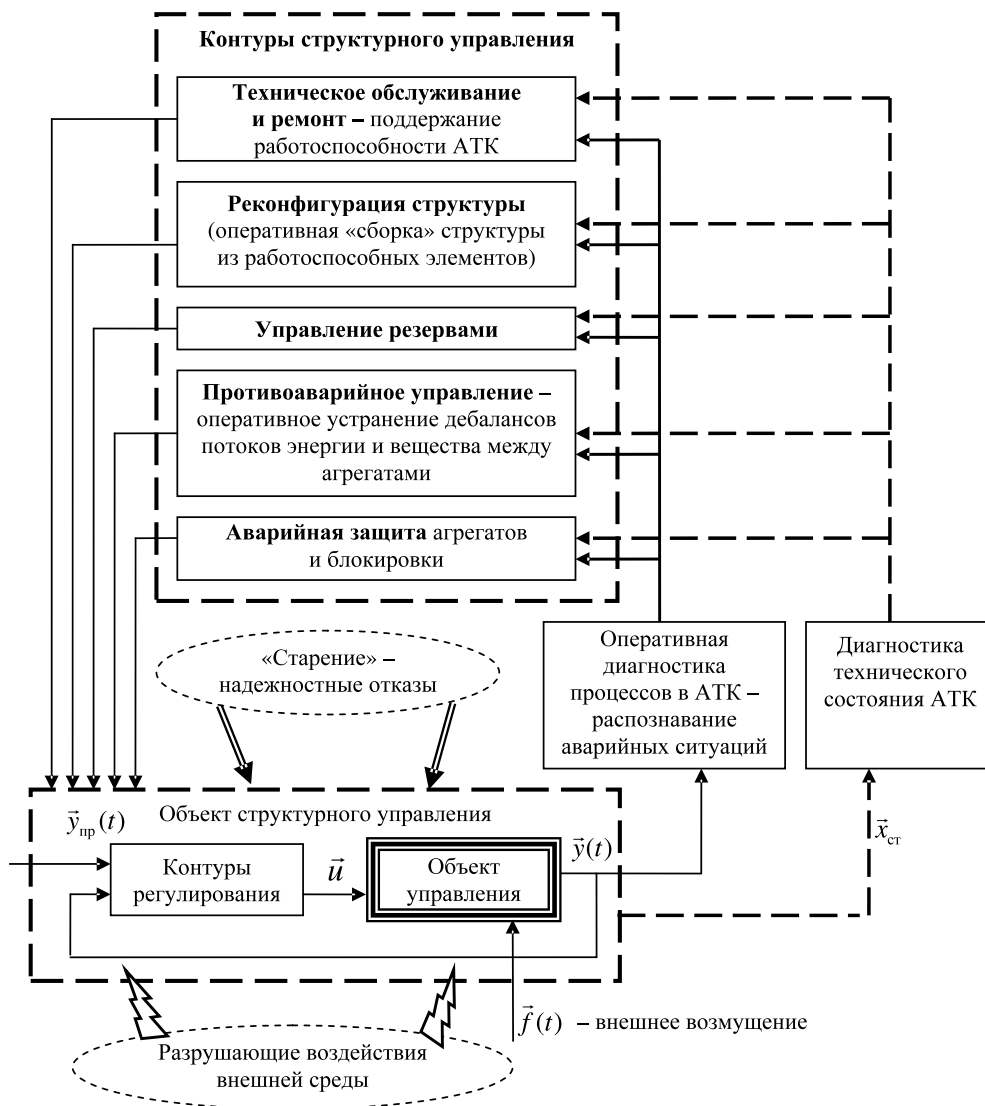


Рис. 1. Контуры структурного управления

характера задачи, ее комбинаторности. Требуется совершенно иной подход к автоматизации управления с разработкой новых принципов структурного управления.

В работах [3, 4] предложено несколько подходов к решению таких трудных и нерешенных в теории задач управления. К наиболее продвинутым результатам следует отнести работу [4], в которой изложена т. н. *методология координированных переключений*, решающая задачу реконфигурации. Согласно этой методологии структура АТК представляется в виде графа, вершины которого обозначают технические элементы (оборудование и устройства), а дуги – связи между элементами, по которым происходит их взаимодействие – обмен ресурсами (веществом, энергией, информацией). То есть элементы рассматриваются один относительно другого как поставщики и потребители производимых или передаваемых ими ресурсов. Каждый элемент АТК для своего функционирования должен быть обе-

спечен всеми необходимыми видами ресурсов. Элемент может иметь несколько альтернативных поставщиков заданного вида ресурса: основной, первый резервный, второй резервный и т. д. При этом всегда должна быть активна связь хотя бы с одним поставщиком. Задача реконфигурации решается следующим образом: если элемент теряет связь с текущим поставщиком ресурса либо по причине повреждения поставщика, либо по причине разрыва физической связи между ними, то задействуется связь со следующим по приоритету использования поставщиком.

Однако численное моделирование для некоторых типов структур показало некорректность данного метода. Рассмотрим электроэнергетическую систему судна кольцевого типа (рис. 2 а). В этой системе три генератора (1 – основной, 2 и 3 – резервные), три распределительных щита (4–6) и три кабельных переключки, обеспечивающих передачу энергии между щитами. Каждый из щитов может быть связан с одним генератором и

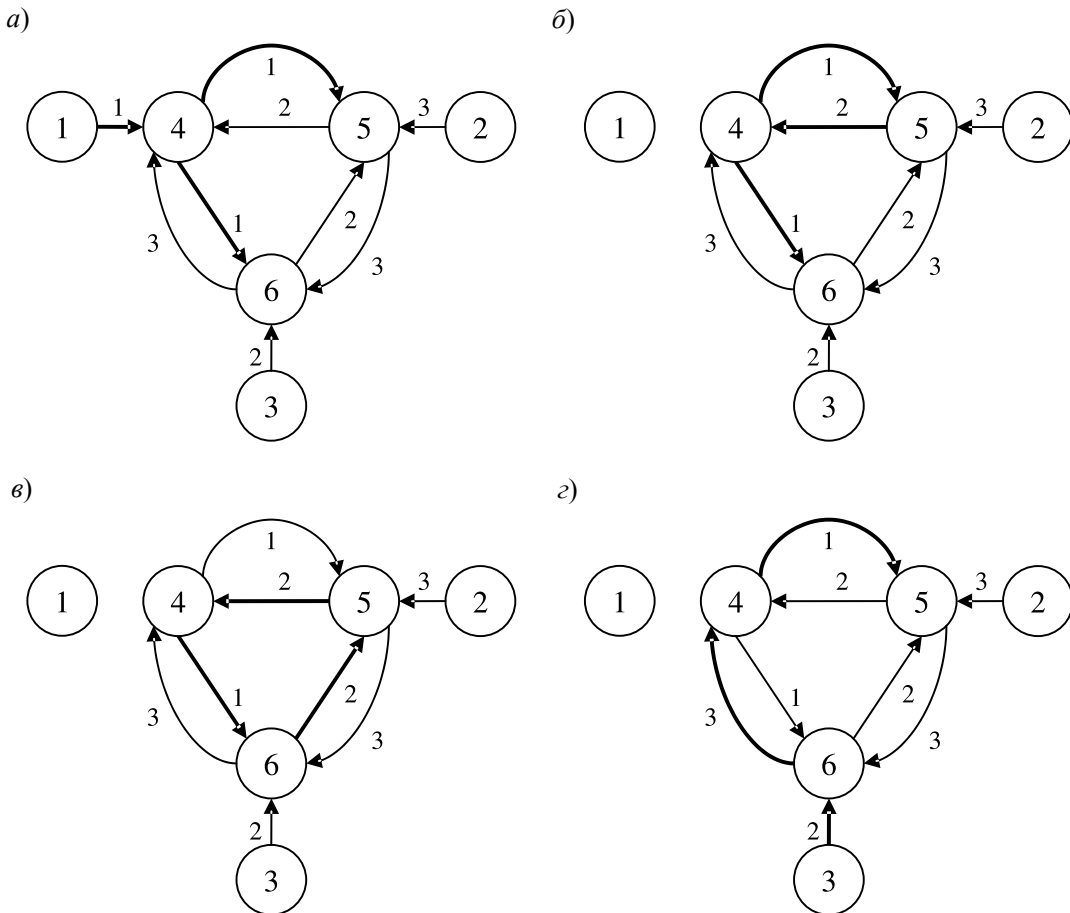


Рис. 2. Кольцевая электроэнергетическая система судна

с остальными щитами. На рис. 1 а основные связи между элементами, соответствующие базовому режиму работы системы, изображены толстой линией, а резервные связи – тонкими. Приоритеты включения связей для обеспечения щитов энергией показаны цифрами у дуг, входящих в соответствующие щитам вершины графа. Кабельные перемычки между щитами моделируются согласно [4] двумя противоположно направленными дугами. Требуется обеспечить наличие энергии на всех щитах в предположении того, что каждый из генераторов обладает уровнем мощности, достаточным для питания всех потребителей.

Предположим, что в процессе эксплуатации системы произошло повреждение кабеля от генератора 1 к щиту 4. Для восстановления электропитания щита 4 алгоритм задействует связь от щита 5 к щиту 4 (первый резерв), как показано на рис. 2 б (толстыми линиями показаны задействованные связи). Происходит парадоксальная ситуация, когда щиты 4 и 5 пытаются одновременно использовать один кабель для получения энергии друг от друга. В [5] этот случай описан и предложен метод его разрешения: щит 5 должен будет перейти к следующему по приоритету поставщику, т. е. к щиту 6 (рис. 2 в). В итоге все щиты «закольцовываются» друг на друга, но ни один из них не соединен с генераторами.

Рассмотренный несколько искусственный пример призван показать, что чересчур «локальный» подход, основанный на рассмотрении только ближайшего окружения элементов АТК, может приводить к неправильным решениям задачи реконфигурации.

Логико-математическая модель работоспособности

Для корректного решения задачи реконфигурации рассматриваемых в статье объектов предлагается использовать математическую модель работоспособности АТК в виде специальной системы логических уравнений (СЛУ) [6]:

$$\begin{cases} y_i = x_i \cdot f_i(x_{i,j} H_{i,j}^{C(j),C(i,j)} y_j; j \in N_i), i = \overline{1, n} \\ Y = F(y_1, \dots, y_n), \end{cases} \quad (1)$$

где n – количество элементов АТК; N_i – подмножество индексов элементов-поставщиков ресурсов для i -го элемента; $x_i, x_{i,j} \in \{0, 1\}$ – соответственно булевы переменные работоспособности i -го элемента и связи между i -м и j -м элементами

(равна единице, если элемент (связь) работоспособен, и нулю, – если поврежден); $y_i \in \{0, 1\}$ – булева переменная функционирования элемента (равна единице, если элемент может выполнять свою функцию, и нулю – в противном случае); $H_{i,j}^{C(j),C(i,j)}$ – переменная-маркер связи между i -м и j -м элементами, где $C(j) \in \{P, T\}$ задает класс элемента, а $C(i, j) \in \{N, J\}$ – класс связи. Булева функция $f_i \in \{0, 1\}$ задает логическое условие обеспеченности i -го элемента необходимыми ресурсами от поставщиков, а функция $F \in \{0, 1\}$ задает условие функционирования всего АТК.

Под P -элементами подразумеваются элементы, содержащие изначальные источники энергии и вещества, благодаря которым функционируют все остальные элементы. T -элементы – это элементы, преобразующие и передающие ресурсы, созданные P -элементами. N -связи – это обычные связи между элементами с фиксированным направлением движения ресурсов, а J -связи – управляемые связи («перемычки»), ресурс в которых может передаваться в любом из двух направлений. Для переменных-маркеров вводится специальное правило $H_{i,j}^{C(j),J} H_{j,i}^{C(i),J} = 0$, задающее запрет на движение ресурса в «перемычке» сразу в двух направлениях.

Для рассмотренного выше примера СЛУ (1) будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} y_1 &= x_1; \quad y_2 = x_2; \quad y_3 = x_3; \\ y_4 &= x_4(x_{4,1} H_{4,1}^{P,N} y_1 \vee x_{4,5} H_{4,5}^{T,J} y_5 \vee x_{4,6} H_{4,6}^{T,J} y_6); \\ y_5 &= x_5(x_{5,2} H_{5,2}^{P,N} y_2 \vee x_{5,4} H_{5,4}^{T,J} y_4 \vee x_{5,6} H_{5,6}^{T,J} y_6); \\ y_6 &= x_6(x_{6,3} H_{6,3}^{P,N} y_3 \vee x_{5,6} H_{6,5}^{T,J} y_5 \vee x_{4,6} H_{6,4}^{T,J} y_4); \\ Y &= y_4 y_5 y_6. \end{aligned}$$

Результатом решения СЛУ относительно переменных y_i и Y является совокупность булевых функций работоспособности (ФР) элементов $\varphi_i(\vec{x})$ и функция работоспособности системы (ФРС) $\varphi_F(\vec{x})$, где $\vec{x} = (x_i, x_{j,k})$ – вектор всех переменных работоспособности элементов и связей АТК. Функции $\varphi_i(\vec{x})$ связывают состояние работоспособности элементов и связей с их возможностью функционирования: $y_i = \varphi_i(\vec{x})$, а функция $\varphi_F(\vec{x})$ – с возможностью функционирования всего АТК в целом: $Y = \varphi_F(\vec{x})$.

Предложенная СЛУ и метод ее решения подробно рассмотрены в [6]. Здесь же будем использовать результаты, полученные в этой статье, для решения задачи реконфигурации.

Метод выбора решения по реконфигурации

Пусть $\varphi_F(\bar{x}) = \bigvee_k X_k^F(\bar{x})$ – представление ФРС φ_F в виде МДНФ. Каждый конъюнкт МДНФ $X_k^F(\bar{x})$ описывает одну из минимальных работоспособных конфигураций (МРК), обеспечивающую выполнение критерия $F(y_1, \dots, y_N) = 1$. Под МРК понимается минимальный набор элементов и связей АТК, работоспособность которых обеспечивает его функционирование. В этом смысле термин «МРК» является распространением широко используемого термина «кратчайший путь успешного функционирования» [7] для АТК с произвольной сетевой структурой и множеством используемых ресурсов.

Для рассматриваемого примера ФРС φ_F в виде МДНФ будет равна

$$\begin{aligned} \varphi_F = & x_1 x_4 x_{4,1} x_{4,5} x_{4,6} x_5 x_6 \vee x_1 x_3 x_4 x_{4,1} x_{4,5} x_5 x_6 x_{6,3} \vee \\ & \vee x_1 x_4 x_{4,1} x_{4,6} x_5 x_{5,6} x_6 \vee x_1 x_4 x_{4,1} x_{4,5} x_5 x_{5,6} x_6 \vee \\ & \vee x_1 x_2 x_4 x_{4,1} x_{4,6} x_5 x_{5,2} x_6 \vee x_1 x_3 x_4 x_{4,1} x_5 x_{5,6} x_6 x_{6,3} \vee \\ & \vee x_1 x_2 x_3 x_4 x_{4,1} x_5 x_{5,2} x_6 x_{6,3} \vee x_3 x_4 x_{4,5} x_{4,6} x_5 x_6 x_{6,3} \vee \\ & \vee x_2 x_4 x_{4,5} x_{4,6} x_5 x_{5,2} x_6 \vee x_1 x_2 x_4 x_{4,1} x_5 x_{5,2} x_5 x_6 x_6 \vee \\ & \vee x_3 x_4 x_{4,5} x_5 x_{5,6} x_6 x_{6,3} \vee x_2 x_3 x_4 x_{4,5} x_5 x_{5,2} x_6 x_{6,3} \vee \\ & \vee x_3 x_4 x_{4,6} x_5 x_{5,6} x_6 x_{6,3} \vee x_2 x_4 x_{4,5} x_5 x_{5,2} x_5 x_6 x_6 \vee \\ & \vee x_2 x_3 x_4 x_{4,6} x_5 x_{5,2} x_6 x_{6,3} \vee x_2 x_4 x_{4,6} x_5 x_{5,2} x_5 x_6 x_6, \end{aligned}$$

что соответствует 16 МРК, т. е. 16 способам обеспечить энергией все распределительные щиты.

Изначально АТК работает в определенном исходном режиме. Вектором $\bar{x}' = (x'_1, \dots, x'_N, x'_{1,2}, \dots, x'_{N-1,N})$ зададим, какие элементы и связи в данный момент задействованы (включены и работают) в исходной конфигурации, а какие – не используются (выключены и не работают):

$$x'_i = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-й элемент задействован} \\ 0, & \text{если } i\text{-й элемент не задействован} \end{cases}$$

$$x'_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{если связь } (i, j) \text{ задействована} \\ 0, & \text{если связь } (i, j) \text{ не задействована} \end{cases}$$

Пусть далее происходит повреждение АТК, заключающееся в потере работоспособности ча-

сти элементов и связей. Данное повреждение опишем вектором $\bar{x}'' = (x''_1, \dots, x''_N, x''_{1,2}, \dots, x''_{N-1,N})$:

$$x''_i = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-й элемент работоспособен} \\ 0, & \text{если } i\text{-й элемент поврежден} \end{cases}$$

$$x''_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{если связь } (i, j) \text{ работоспособна} \\ 0, & \text{если связь } (i, j) \text{ повреждена} \end{cases}$$

Значение функции $\varphi_i(\bar{x}'')$ будет равно единице, если i -й элемент может функционировать в поврежденном АТК, и равно нулю, если данный элемент полностью потерял возможность функционирования. Аналогично равенство единице ФР $\varphi_F(\bar{x}'')$ означает, что АТК может продолжить функционирование, а нулю – что не может.

Определим вектор $\bar{x}''' = (x'''_1, \dots, x'''_N, x'''_{1,2}, \dots, x'''_{N-1,N})$ следующим образом: $x'''_i = x'_i x''_i$, $x'''_{i,j} = x'_{i,j} x''_{i,j}$. В данном векторе равны единице переменные работоспособности тех элементов и связей, которые входили в исходную конфигурацию АТК и не потеряли работоспособность в результате повреждений. Множество $\tilde{E} = \{i : x'''_i = 1 \wedge \varphi_i(\bar{x}''') = 0\}$ определяет те элементы исходной конфигурации АТК, которые потеряли возможность нормального функционирования. Если $\varphi_F(\bar{x}''') = 0$, но $\varphi_F(\bar{x}'') = 1$, то есть возможность реконфигурировать (выбрать новую рабочую конфигурацию) АТК с целью восстановления его функционирования.

Пусть изначально конъюнкты ФР $\varphi_F X_k^F(\bar{x})$ упорядочены так, что меньшим индексом k обладают те конъюнкты, которые соответствуют более предпочтительным, оптимальным МРК, например, по соображениям эффективности и надежности, или по любому другому приоритету. Множество номеров МРК, доступных в поврежденной структуре АТК, определяется как $K^* = \{k : X_k^F(\bar{x}'') = 1\}$. За новую рабочую конфигурацию АТК примем наиболее оптимальную МРК, описываемую конъюнктом с наименьшим номером $k^* = \min K^*$. Вектор новых задействованных элементов и связей $\bar{x}^* = (x^*_1, \dots, x^*_N, x^*_{1,2}, \dots, x^*_{N-1,N})$ определим как

$$x^*_i = \begin{cases} 1, & \text{если переменная } x_i \text{ входит в конъюнкт } X_{k^*}^F \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}$$

$$x^*_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{если переменная } x_{i,j} \text{ входит в конъюнкт } X_{k^*}^F \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}$$

Вектор \vec{x}^* задает, какие элементы и связи АТК должны быть включены в работу, а какие выведены из работы.

Для рассматриваемого примера 16 конъюнктов в ФРС φ_F , показанные выше, были упорядочены так, чтобы раньше стояли более приоритетные конфигурации, в которых максимум щитов подключены к основному источнику энергии (своему генератору или соседнему щиту), а в случае, если это невозможно, то к первому резервному. Таким образом, первый конъюнкт соответствует основному режиму, а последний – самому «неэффективному».

При повреждении связи между генератором 1 и щитом 4 ($x_{4,1} = 0$), описанный алгоритм предложит в качестве новой конфигурации восьмой конъюнкт $x_3x_4x_{4,5}x_{4,6}x_5x_6x_{6,3}$, т. к. предыдущие будут обнулены. Это соответствует цепочке питания $3 \rightarrow 6 \rightarrow 4 \rightarrow 5$, что действительно физически реализуемо (рис. 2 з). В связи с тем, что предложенный метод опирается не на локальные переключения связей между элементами, как это принято в [4], а на полный список минимальных работоспособных конфигураций, невозможна ситуация, когда контур реконфигурации предложит вариант неработоспособной структуры или упустит один из работоспособных.

Пример

Рассмотрим работу метода реконфигурации на примере АТК, изображенного на рис. 3 а. В этом упрощенном примере парогенераторы 1 и 2 для своей работы требуют одновременной подачи воды (обеспечивается насосами 11 и 12) и электроэнергии для собственных нужд (например, для управления), подающихся со щитов 5 и 6. Парогенераторы могут обеспечиваться электроэнергией от аккумуляторных батарей (7 и 8), от турбогенераторов 3 и 4 (самоподдерживающийся замкнутый процесс) или друг от друга через кабельные перемычки 9 и 10.

Для сокращения записи будем считать, что все связи всегда работоспособны, кроме перемычек 9 и 10, которые выделим в отдельные элементы. СЛУ, моделирующая работоспособность АТК, будет иметь вид:

$$\begin{aligned} y_1 &= x_1 H_{1,5}^{T,N} y_5 H_{1,11}^{P,N} y_{11}; \quad y_2 = x_2 H_{2,6}^{T,N} y_6 H_{2,12}^{P,N} y_{12}; \\ y_3 &= x_3 H_{3,1}^{P,N} y_3; \quad y_4 = x_4 H_{4,2}^{P,N} y_2; \\ y_5 &= x_5 (H_{5,3}^{T,N} y_3 \vee H_{5,7}^{P,N} y_7 \vee H_{5,9}^{T,J} y_9 \vee H_{5,10}^{T,J} y_{10}); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y_5 &= x_6 (H_{6,4}^{T,N} y_4 \vee H_{6,8}^{P,N} y_8 \vee H_{6,9}^{T,J} y_9 \vee H_{6,10}^{T,J} y_{10}); \\ y_7 &= x_7; \quad y_8 = x_8; \\ y_9 &= x_9 (H_{9,5}^{T,J} y_5 \vee H_{9,6}^{T,J} y_6); \\ y_{10} &= x_{10} (H_{10,5}^{T,J} y_5 \vee H_{10,6}^{T,J} y_6); \\ y_{11} &= x_{11} H_{11,5}^{T,N} y_5; \quad y_{12} = x_{12} H_{12,6}^{T,N} y_6; \quad Y = y_5 y_6. \end{aligned}$$

Уравнение $Y = F(y_5, y_6) = y_5 y_6$ задает критерий функционирования АТК: наличие энергии на обоих распределительных щитах 5 и 6. В этом случае ФРС равна:

$$\begin{aligned} \varphi_F(\vec{x}) &= x_1 x_2 x_3 x_4 x_5 x_6 x_{11} x_{12} \vee x_1 x_3 x_5 x_6 x_9 x_{11} \vee \\ &\vee x_2 x_4 x_5 x_6 x_9 x_{12} \vee x_1 x_3 x_5 x_6 x_{10} x_{11} \vee x_2 x_4 x_5 x_6 x_{10} x_{12} \vee \\ &\vee x_1 x_3 x_5 x_6 x_8 x_{11} \vee x_2 x_4 x_5 x_6 x_7 x_{12} \vee x_5 x_6 x_7 x_8 \vee \\ &\vee x_5 x_6 x_7 x_9 \vee x_5 x_6 x_8 x_9 \vee x_5 x_6 x_7 x_{10} \vee x_5 x_6 x_8 x_{10}. \end{aligned}$$

Данная ФРС описывает 12 МРК, упорядоченных по следующему приоритету: сначала используются генераторы 2 и 4, затем аккумуляторы 7 и 8. Вектор переменных работоспособности определим как $\vec{x} = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12})$.

Пусть изначально $\vec{x}' = (1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1)$, т. е. используются элементы 1–6, 11 и 12, что соответствует основному режиму (рис. 3 а). Пусть далее произошло повреждение генератора 4 ($x_4 = 0$). Вектор поврежденный будет равен $\vec{x}'' = (1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)$. $\vec{x}''' = (1, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1)$.

$\varphi_F(\vec{x}''') = 0$, следовательно, критерий F больше не выполняется. Но т. к. $\varphi_F(\vec{x}'') = 1$, то можно выбрать новую рабочую конфигурацию. Этой конфигурацией будет МРК, соответствующая второму конъюнкту $x_1 x_3 x_5 x_6 x_9 x_{11}$, т. е. питанию щита 6 от щита 5 через кабельную перемычку 9 (рис. 3 б). Новый вектор используемых элементов будет равен $\vec{x}^* = (1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 0)$.

Далее пусть произошло повреждение парогенератора 1 и кабельной перемычки 10. Вектор поврежденный $\vec{x}'' = (0, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1)$. Вектор $\vec{x}''' = (0, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 0)$. $\varphi_F(\vec{x}''') = 0$, следовательно, критерий F больше не выполняется. Но т. к. $\varphi_F(\vec{x}'') = 1$, то можно выбрать новую рабочую конфигурацию. Этой конфигурацией будет МРК, соответствующая восьмому конъюнкту $x_5 x_6 x_7 x_8$, т. е. питанию щитов 5 и 6 от аккумуляторных батарей 7 и 8 (рис. 3 в). Новый вектор используемых элементов будет равен $\vec{x}^* = (0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0)$.

Теперь рассмотрим повреждение аккумуля-

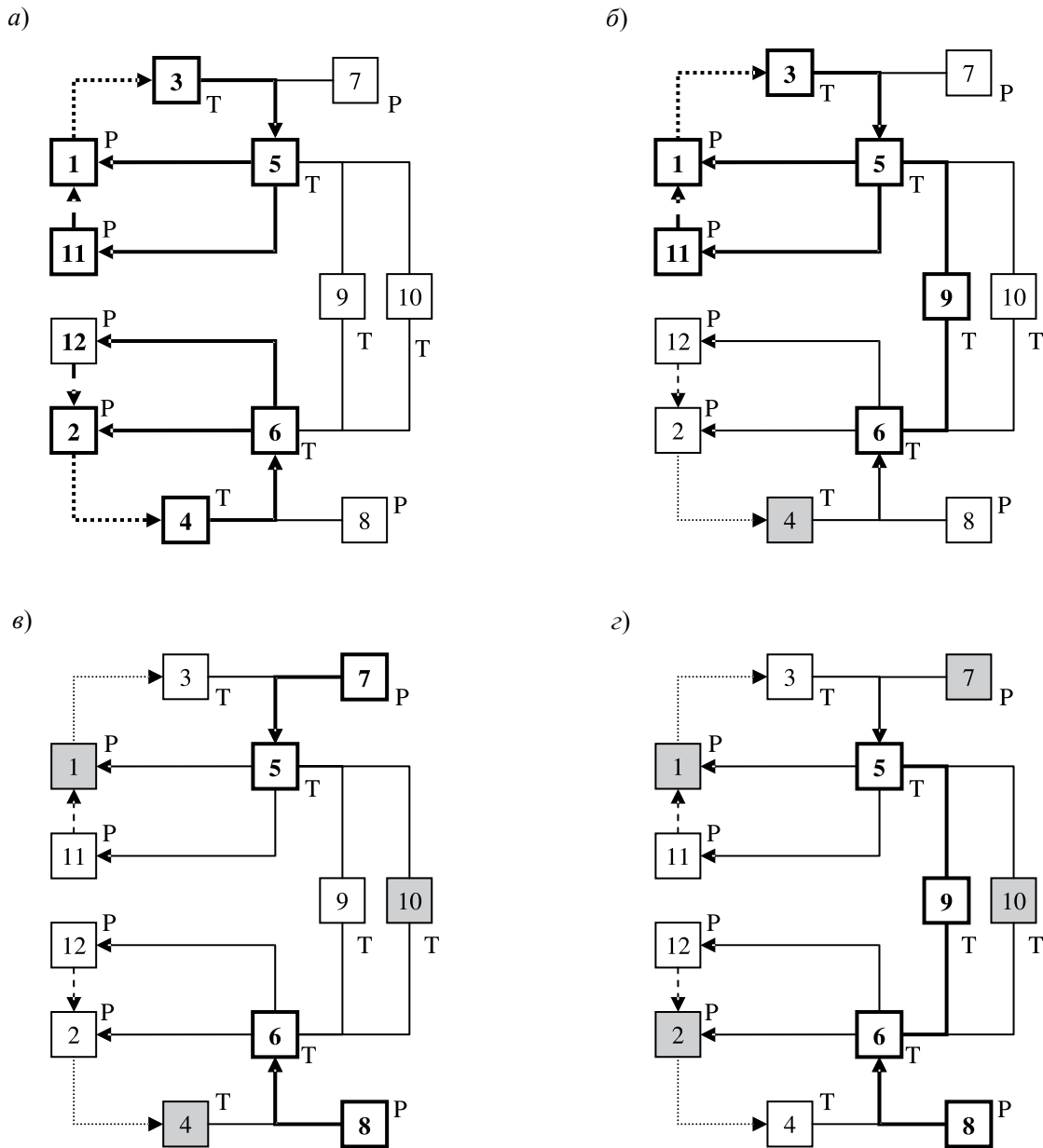


Рис. 3. Пример структурно-сложного АК и его реконфигурации

тора 7. Вектор повреждений $\bar{x}'' = (0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1)$. $\bar{x}''' = (0, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0)$. $\varphi_F(\bar{x}''') = 0$, $\varphi_F(\bar{x}'') = 1$, следовательно, возможна реконфигурация. Доступной осталась МРК, соответствующая десятому конъюнкту $x_5x_6x_8x_9$ ФР $\varphi_F(\bar{x})$, которая и принимается за новую конфигурацию (рис. 3 г). $\bar{x}^* = (0, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0)$.

Если в дальнейшем произойдет повреждение кабельной перемычки 9, то $\bar{x}'' = (0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1)$ и $\varphi_F(\bar{x}'') = 0$. Иными словами, при данных повреждениях уже невоз-

можно восстановить функционирование АК по критерию F . Если имеется второй критерий функционирования $Y' = G(\bar{y}) = y_5 + y_6$, задающий требование наличия энергии хотя бы на одном из щитов 5 или 6, то можно реконфигурировать АК по этому более «слабому» критерию. ФРС для критерия G равна $\varphi_G(\bar{x}) = x_1x_3x_5x_{11} \vee x_2x_4x_5x_{12} \vee x_5x_7 \vee x_6x_8$. $\varphi_G(\bar{x}'') = 1$. В качестве новой конфигурации принимается МРК, соответствующая конъюнкту x_6x_8 . Вектор новой конфигурации $\bar{x}^* = (0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 0)$.

Предложенный метод реконфигурации опирается на корректную математическую модель работоспособности АТК и метод вывода ФРС, учитывающие такие особенности структурно-сложных систем, как наличие множества подсистем, различных видов ресурсов, произвольную сетевую структуру АТК, управляемых связей и замкнутых самоподдерживающихся технологических контуров.

Получаемая в результате решения специальной системы логических уравнений функция работоспособности системы в виде минимальной дизъюнктивной формы описывает все возможные в АТК минимальные работоспособные конфигурации, обеспечивающие его функционирование. Поэтому ФРС может использоваться не только с целью расчета показателей надежно-

сти и живучести, но и как основа системы информационной поддержки персонала при борьбе за живучесть и структурного контура реконфигурации.

При записи всех конъюнктов ФРС в базу данных время, необходимое для выбора новой оптимальной конфигурации, является незначительным, а более затратный по времени процесс заполнения базы данных (решения СЛУ) может реализовываться при проектировании. При этом для верификации адекватности синтезируемого контура реконфигурации не требуется проводить полный перебор всех возможных комбинаций отказов элементов и связей и вариантов переключений, что для АТК, состоящих из сотен или тысяч элементов, является технически крайне сложным или даже невозможным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Войтецкий В.В.** Развитие методологии, теории и принципов организации КСУ ТС кораблей (судов) и управляющих систем типа АСУ ТП технических комплексов с повышенным риском эксплуатации [Текст] / В.В. Войтецкий, И.П. Симаков // Юбилейный научно-технический сб. НПО «Аврора». –СПб.: Изд-во НПО «Аврора», 1995.
2. **Волик, Б.Г.** Анализ и синтез структур управляющих систем [Текст] / Б.Г. Волик, Б.Б. Буянов, Н.В. Лубков [и др.]; под ред. Б.Г. Волика. –М.: Энергоатомиздат, 1988.
3. **Simakov, M.A.** Control systems with knowledgebase: matematics, development technology and usage of automated complexes in systems of operators' intellectual support systems [Text] / M.A. Simakov, A.G. Zuenkov, A.N. Poletykin [et al.] // Proc. of International Conf. on Informatics and Cjntrol. –SPb., 9-13 June, 1997.

4. **Ярошенко, А.В.** Автоматизация восстановления работоспособности систем сложной структуры [Текст] / А.В. Ярошенко // Автоматика и телемеханика. –2002. –№ 7.
5. **Ярошенко, А.В.** Метод координированных переключений [Текст] / А.В. Ярошенко. –СПб.: ВМА, 1999.
6. **Холодных, П.В.** Логико-математическая модель структурно-сложной технической системы и ее применение [Текст] / П.В. Холодных // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. –2011. –№ 2 (120). –С. 151–156.
7. **Рябинин, И.А.** Логико-вероятностное исчисление как аппарат исследования надежности и безопасности структурно-сложных систем [Текст] / И.А. Рябинин // Автоматика и телемеханика. –2003. –№ 7.

REFERENCES

1. **Voitetskii V.V., Simakov I.P.** Razvitie metodologii, teorii i printsipov organizatsii KSU TS korablei (sudov) i upravliaiushchikh sistem tipa ASU TP tekhnicheskikh kompleksov s povyshennym riskom ekspluatatsii / V Iubileinom nauchno-tekhnicheskom sbornike NPO Avrora. – St. Petersburg, 1995. (rus)
2. **Volik B.G., Buianov B.B., Lubkov N.V. i dr.** Analiz i sintez struktur upravliaiushchikh sistem; pod red. B.G. Volika. – Moscow: Energoatomizdat, 1988. (rus)
3. **Simakov M.A., Zuenkov A.G., Poletykin A.N. i dr.** Control systems with knowledgebase: matematics, development technology and usage of automated complexes in systems of operators' intellectual support systems / Proc.of International Conf. on Informatics and Cjntrol, St. Petersburg, 9-13 June, 1997. (rus)

4. **Iaroshenko A.V.** Avtomatizatsiia vosstanovleniia rabotosposobnosti sistem slozhnoi struktury / Avtomatika i telemekhanika. –2002. – №7. (rus)
5. **Iaroshenko A.V.** Metod koordinirovannykh perekliucheni. – St. Petersburg: VMA, 1999. (rus)
6. **Kholodnykh P.V.** Logiko-matematicheskaiia model' strukturno-slozhnoi tekhnicheskoi sistemy i ee primeneniye / Nauchno-tekhnicheskije vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie. – 2011. – № 2 (120). –S. 151–156. (rus)
7. **Riabini I.A.** Logiko-veroiatnostnoe ischislenie kak apparat issledovaniia nadezhnosti i bezopasnosti strukturno-slozhnykh sistem. Avtomatika i telemekhanika. –2003. –№ 7. (rus)