



УДК 519.876

КОМПОЗИЦИОННЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ ИЕРАРХИЧЕСКИХ МНОГОУРОВНЕВЫХ МАРШРУТИЗИРУЮЩИХ СИСТЕМ

Р.Б. Трегубов^а

^аАкадемия Федеральной службы охраны Российской Федерации, Орел, 302034, Российская Федерация, treba@list.ru
Адрес для переписки: treba@list.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 24.06.16, принята к печати 20.07.16

doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-5-879-892

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Трегубов Р.Б. Композиционный метод исследования надежности иерархических многоуровневых маршрутизирующих систем // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 5. С. 879–892. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-5-879-892

Аннотация

Изложена идея метода исследования иерархических многоуровневых маршрутизирующих систем, представляющего собой композицию методов теорий графов, надежности, вероятностей и др., применяемых для решения различных частных задач анализа и оптимизации, системно связанных и согласованных друг с другом через единое теоретико-множественное представление объекта исследования. В качестве иерархических многоуровневых маршрутизирующих систем рассматриваются инфраструктурные объекты (газо- и нефтепроводы, авто- и железнодорожные сети, системы энергоснабжения и инфокоммуникации), в которых реализуется распределение материальных ресурсов, энергии или информации с использованием иерархически вложенных функций маршрутизации. Для наглядности изложения теоретические конструкции рассмотрены на примере решения задачи определения вероятности работоспособного состояния конкретной инфокоммуникационной системы. Показана возможность конструктивного сочетания графового представления структуры объекта исследования и логико-вероятностного метода анализа его показателей надежности через единое теоретико-множественное представление его элементов и процессов, протекающих в них.

Ключевые слова

надежность, моделирование, структура, иерархическая многоуровневая система, маршрутизация, теория множеств, вероятность работоспособного состояния

COMPOSITE METHOD OF RELIABILITY RESEARCH FOR HIERARCHICAL MULTILAYER ROUTING SYSTEMS

R.B. Tregubov^a

^aAcademy of Federal Guard Service of the Russian Federation, Orel, 302034, Russian Federation
Corresponding author: treba@list.ru

Article info

Received 24.05.16, accepted 20.07.16

doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-5-879-892

Article in Russian

For citation: Tregubov R.B. Composite method of reliability research for hierarchical multilayer routing systems *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, vol. 16, no. 5, pp. 879–892. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-5-879-892

Abstract

The paper deals with the idea of a research method for hierarchical multilayer routing systems. The method represents a composition of methods of graph theories, reliability, probabilities, etc. These methods are applied to the solution of different private analysis and optimization tasks and are systemically connected and coordinated with each other through uniform set-theoretic representation of the object of research. The hierarchical multilayer routing systems are considered as infrastructure facilities (gas and oil pipelines, automobile and railway networks, systems of power supply and communication) with distribution of material resources, energy or information with the use of hierarchically nested functions of routing. For descriptive reasons theoretical constructions are considered on the example of task solution of probability determination for up state of specific infocommunication system. The author showed the possibility of constructive combination of graph representation of structure of the object of research and a logic probable analysis method of its reliability indices through uniform set-theoretic representation of its elements and processes proceeding in them.

Keywords

reliability, simulation, structure, hierarchical multilayer system, routing, set theory, up state probability

Введение

В настоящее время надежность функционирования инфраструктурных объектов, таких как инфокоммуникационные, авто- или железнодорожные сети, газотранспортные, нефтепроводные и энергетические системы и пр. [1–6], определяет потенциально достижимый уровень экономической состоятельности страны, влияет на ее обороноспособность и национальную безопасность. Все эти объекты относятся к большим распределенным многоуровневым системам, а методы их моделирования, анализа и оптимизации сложны и часто базируются на эвристических подходах. Актуальными в предметной области являются научные проблемы разработки, с одной стороны, строго аналитических, а с другой стороны, конструктивных и простых в применении методов исследования надежности инфраструктурных объектов [7].

Современные строгие методы анализа надежности больших технических систем часто заключаются в представлении объекта исследования в виде параллельных, последовательных, «мостиковых» или древовидных соединений элементов. Сложность инфраструктурных объектов состоит в том, что при математическом описании их структуры, как правило, не могут быть сведены к простым топологиям. Кроме того, реализуя оперативное распределение материальных ресурсов, энергии или информации с использованием иерархически вложенных функций управления потоками и (или) маршрутизации, перечисленные объекты могут менять во времени свою текущую топологию. В связи с этим их предлагается классифицировать как сложные иерархические многоуровневые маршрутизирующие системы (ИММС) [8]. В составе таких систем предусмотрены специализированные маршрутизирующие подсистемы, предназначенные для преобразования наименования или адреса элемента маршрутизирующей подсистемы в маршрут для достижения этого элемента.

В [8] предложен формальный язык описания таких систем в теоретико-множественном базисе, позволяющий строго математически представить различные элементы ИММС и процессы, реализуемые в них. Ниже данная идея развивается в направлении формирования нового метода исследования, представляющего собой композицию методов теорий графов, надежности, вероятностей и др., применяемых для решения различных частных задач анализа и оптимизации ИММС, системно связанных и согласованных друг с другом через единое теоретико-множественное формальное представление объекта исследования.

Общие положения

Одним из ведущих показателей функционирования инфраструктурных объектов является их надежность [1–6]. Здесь и далее под надежностью [2] понимается способность системы сохранять свойства, необходимые для выполнения заданного назначения, при нормальных (повседневных) условиях ее эксплуатации в течение требуемого промежутка времени¹. Известно, что работоспособным является такое состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации¹. Для больших технических систем (ИММС, в частности) возможны такие ситуации, при которых из множества неработоспособных состояний выделяют частично неработоспособные состояния, при которых объект способен частично выполнять требуемые функции.

В различных отраслях знания для структурно-сложных объектов вводятся показатели, характеризующие возможность и способность сохранять работоспособность в различных условиях. Так, например, для сетей электросвязи (инфокоммуникаций) рассматриваются свойства устойчивости функционирования, надежности и живучести². Однако в качестве основных интегральных параметров, количественно отражающих перечисленные выше характеристики, традиционно используются коэффициент готовности и вероятность связности [9, 10].

В настоящей работе используются следующие трактовки данных терминов. Коэффициент готовности – вероятность того, что объект находится в работоспособном состоянии в любой момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается¹. Вероятность связности (связность) направления связи (двухполюсной сети связи, ДСС) – вероятность того, что на заданном направлении связи существует хотя бы один путь, по которому возможна передача информации с требуемым качеством и объемом².

Далее на примере этих характеристик надежности исследуются возможности нового метода формализации структурно-сложных систем. Метод анализа и оптимизации ИММС, при котором система, задачи анализа и оптимизации представляются средствами теории множеств, а решение этих задач производится с помощью композиции методов теорий графов, надежности, вероятностей и др., далее называется композиционным методом.

¹ ГОСТ 27.002–89 Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.

² ГОСТ Р 53111–2008 Устойчивость функционирования сети связи общего пользования. Требования и методы проверки

**Теоретико-множественное представление задачи анализа надежности
иерархических многоуровневых маршрутизирующих систем**

Исследования показали [7, 8], что теория множеств (ТМ) является наглядным и конструктивным инструментом формального описания ИМСС. Ниже возможности теоретико-множественного представления демонстрируются на примере задачи анализа надежности инфокоммуникационной системы (ИКС). При этом целью функционирования ИКС является доставка блоков данных с заданным качеством по заданным адресам через различные соединения (логические, коммутационные и т.д., а также двухполюсные и многополюсные сети связи [8]).

Пусть множество состояний (работоспособное и неработоспособное) ИКС задано следующим образом:

$$ST = \{0, 1\}.$$

В соответствии с [8] ниже обозначаются: A_n – множество логических объектов n -го уровня; $LC_{n-1,s,k}$ – множество логических соединений $(n-1)$ -го уровня; $WC_{n,s,k}$ – множество коммутационных соединений n -го уровня; M_n – множество маршрутов соединений «точка-точка» n -го уровня; Y_n – множество ДСС n -го уровня; W_n – множество многополюсных сетей связи (МСС) n -го уровня. Уровни могут определяться относительно модели взаимодействия открытых систем [8].

С точки зрения ТМ, состояние логического объекта, логического соединения, коммутационного соединения и т.д. является соответствием между заданным множеством ($A_n, LC_{n-1,s,k}, WC_{n,s,k}, M_n, Y_n$ или W_n) и множеством состояний ИМСС (ST), так что

$$\begin{aligned} (A_n, ST, STA_n) &\Leftrightarrow A_n \xrightarrow{STA_n} ST; \\ (LC_{n-1,s,k}, ST, STLC_{n-1,s,k}) &\Leftrightarrow LC_{n-1,s,k} \xrightarrow{STLC_{n-1,s,k}} ST; \\ (WC_{n,s,k}, ST, STWC_{n,s,k}) &\Leftrightarrow WC_{n,s,k} \xrightarrow{STWC_{n,s,k}} ST; \\ (M_n, ST, STM_n) &\Leftrightarrow M_n \xrightarrow{STM_n} ST; \\ (Y_n, ST, STY_n) &\Leftrightarrow Y_n \xrightarrow{STY_n} ST; \\ (W_n, ST, STW_n) &\Leftrightarrow W_n \xrightarrow{STW_n} ST, \end{aligned}$$

где $STA_n = \{ \dots, sta_l^{(n)}, \dots \}$ – подмножество множества кортежей из двух элементов $sta_l^{(n)} = (a_j^{(n)}, st_g)$, включающих адрес логического объекта n -го уровня $a_j^{(n)}$ и его состояние st_g ; $STLC_{n-1,s,k} = \{ \dots, stlc_l^{(n-1,s,k)}, \dots \}$ – подмножество множества кортежей из двух элементов $stlc_l^{(n-1,s,k)} = (lc_j^{(n-1,s,k)}, st_g)$, включающих логическое соединение $(n-1)$ -го уровня $lc_j^{(n-1,s,k)}$ и его состояние st_g ; $STWC_{n,s,k} = \{ \dots, stwc_l^{(n,s,k)}, \dots \}$ – подмножество множества кортежей из двух элементов $stwc_l^{(n,s,k)} = (wc_j^{(n,s,k)}, st_g)$, включающих коммутационное соединение n -го уровня $wc_j^{(n,s,k)}$ и его состояние st_g ; $STM_n = \{ \dots, stm_l^{(n)}, \dots \}$ – подмножество множества кортежей из двух элементов $stm_l^{(n)} = (\mu_{a_i^{(n)}, a_j^{(n)}, RT_{n,h,hl}}^{(n)}, st_g)$, включающих маршрут соединения «точка-точка» между логическим объектом с адресом $a_i^{(n)}$ n -го уровня и логическим объектом $a_j^{(n)}$ того же уровня $\mu_{a_i^{(n)}, a_j^{(n)}, RT_{n,h,hl}}^{(n)}$, полученный на основании таблицы маршрутизации соединений «точка-точка» $RT_{n,h}$ того же уровня и его состояние st_g ; $STY_n = \{ \dots, sty_l^{(n)}, \dots \}$ – подмножество множества кортежей из двух элементов $sty_l^{(n)} = (\nu_{a_i^{(n)}, a_j^{(n)}, hl}^{(n)}, st_g)$, включающих двухполюсную сеть связи между логическим объектом с адресом $a_i^{(n)}$ n -го уровня и логическим объектом $a_j^{(n)}$ того же уровня $\nu_{a_i^{(n)}, a_j^{(n)}, hl}^{(n)}$ и ее состояние st_g ; $STW_n = \{ \dots, stw_l^{(n)}, \dots \}$ – подмножест-

во множества кортежей из двух элементов $stw_l^{(n)} = (w_{k,hl}^{(n)}, st_g)$, включающих: МСС между заданной группой логических объектов n -го уровня $w_{k,hl}^{(n)}$ и ее состояние st_g .

Строгое формальное описание показателей надежности можно получить с использованием одно-родной логической функции (ЛФ), значения которой принадлежат множеству $\{0, 1\}$ [2] и аргументами которой также являются элементы множества $\{0, 1\}$. Так, ЛФ, связывающую состояния логических объектов n -го уровня [8], состояния логических соединений «точка-точка» $(n-1)$ -го уровня, состояния коммутационных соединений «точка-точка» n -го уровня с состояниями маршрутов соединений «точка-точка» n -го уровня, целесообразно записать в виде соответствий

$$\begin{aligned} & (\mathbf{STA}_n, \mathbf{STLC}_{n-1,1,1}, \mathbf{STWC}_{n,1,1}, \mathbf{STM}_n, \mathbf{LFSTALCWCM}_n) \Leftrightarrow \\ & \Leftrightarrow \mathbf{STA}_n \times \mathbf{STLC}_{n-1,1,1} \times \mathbf{STWC}_{n,1,1} \xrightarrow{\mathbf{LFSTALCWCM}_n} \mathbf{STM}_n, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\mathbf{STA}_n = \{\dots, STA_{n,t}, \dots\}$ – множество различных вариантов состояний логических объектов n -го уровня; $\mathbf{STLC}_{n-1,1,1} = \{\dots, STLC_{n-1,1,1,h}, \dots\}$ – множество различных вариантов состояний логических соединений «точка-точка» $(n-1)$ -го уровня; $\mathbf{STWC}_{n,1,1} = \{\dots, STWC_{n,1,1,g}, \dots\}$ – множество различных вариантов состояний коммутационных соединений «точка-точка» n -го уровня; $\mathbf{STM}_n = \{\dots, STM_{n,t}, \dots\}$ – множество различных вариантов состояний маршрутов соединений «точка-точка» n -го уровня; $\mathbf{LFSTALCWCM}_n = \{\dots, lfstalcwcm_q^{(n)}, \dots\}$ – подмножество множества кортежей из элементов $lfstalcwcm_q^{(n)} = (STA_{n,t}, STLC_{n-1,1,1,h}, STWC_{n,1,1,g}, STM_{n,t})$, включающих состояния логических объектов n -го уровня $STA_{n,t}$, состояния логических соединений «точка-точка» $(n-1)$ -го уровня $STLC_{n-1,1,1,h}$, состояния коммутационных соединений «точка-точка» n -го уровня $STWC_{n,1,1,g}$ и состояния маршрутов соединений «точка-точка» n -го уровня $STM_{n,t}$, взаимосвязанных с помощью соответствующего соответствия.

Логическая функция, связывающая состояния маршрутов соединений «точка-точка» n -го уровня с состояниями ДСС n -го уровня, представляет собой соответствие вида

$$\begin{aligned} & (\mathbf{STM}_n, \mathbf{STY}_n, \mathbf{LFSTMY}_n) \Leftrightarrow \mathbf{STM}_n \xrightarrow{\mathbf{LFSTMY}_n} \mathbf{STY}_n = \\ & = \mathbf{STA}_n \times \mathbf{STLC}_{n-1,1,1} \times \mathbf{STWC}_{n,1,1} \xrightarrow{\mathbf{LFSTMY}_n \circ \mathbf{LFSTALCWCM}_n} \mathbf{STY}_n, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\mathbf{STY}_n = \{\dots, STY_{n,t}, \dots\}$ – множество различных вариантов состояний ДСС n -го уровня; $\mathbf{LFSTMY}_n = \{\dots, lfstmy_q^{(n)}, \dots\}$ – подмножество множества кортежей из двух элементов $lfstmy_q^{(n)} = (STM_{n,g}, STY_{n,t})$, включающих состояния маршрутов соединений «точка-точка» n -го уровня $STM_{n,g}$, состояния ДСС n -го уровня $STY_{n,t}$, взаимосвязанных с помощью соответствующего соответствия.

Логическую функцию, связывающую состояния двухполюсных сетей связи n -го уровня с состояниями многополюсных сетей связи n -го уровня, целесообразно представить как

$$\begin{aligned} & (\mathbf{STY}_n, \mathbf{STW}_n, \mathbf{LFSTYW}_n) \Leftrightarrow \mathbf{STY}_n \xrightarrow{\mathbf{LFSTYW}_n} \mathbf{STW}_n = \\ & = \mathbf{STA}_n \times \mathbf{STLC}_{n-1,1,1} \times \mathbf{STWC}_{n,1,1} \xrightarrow{\mathbf{LFSTYW}_n \circ \mathbf{LFSTMY}_n \circ \mathbf{LFSTALCWCM}_n} \mathbf{STW}_n, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\mathbf{STW}_n = \{\dots, STW_{n,t}, \dots\}$ – множество различных вариантов состояний МСС n -го уровня; $\mathbf{LFSTYW}_n = \{\dots, lfstyw_q^{(n)}, \dots\}$ – подмножество множества кортежей из двух элементов $lfstyw_q^{(n)} = (STY_{n,g}, STW_{n,t})$, включающих состояния ДСС связи n -го уровня $STY_{n,g}$, состояния многополюсных сетей связи n -го уровня $STW_{n,t}$, взаимосвязанных с помощью соответствующего соответствия.

Логические функции, представленные выражениями (1)–(3), имеют важное значение для решения задач определения вероятности работоспособного состояния ИКС. Этому способствует наличие в алгебре логики таких форм представления логических функций, замечательными свойствами которых является возможность замещения логических переменных вероятностями того или иного состояния этих перемен-

ных, а логических операций – арифметическими. Для примера ниже представлено решение задачи получения логической функции (в дизъюнктивной нормальной форме), описывающей условие работоспособного состояния двухполюсной сети связи ИКС, представленной графом (рис. 1). Пусть по требованиям заказчика состояние считается работоспособным, если безотказны как минимум два из трех маршрутов ее образующих.

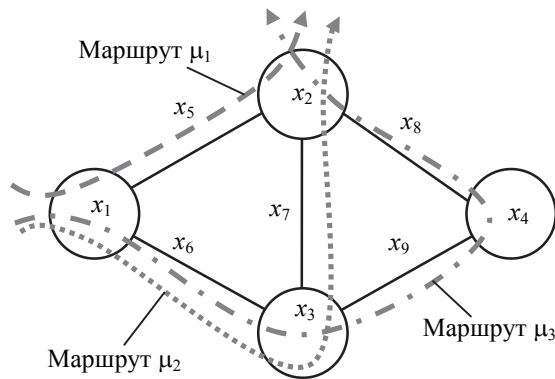


Рис. 1. Двухполюсная сеть связи инфокоммуникационной системы с указанием маршрутов на ней

На первом этапе с помощью функции логического сочетания [11] необходимо описать математически условие работоспособного состояния ДСС и образующих ее маршрутов, заданное вербально («два из трех маршрутов»). Для маршрутов, отмеченных на рис. 1, ДСС можно записать как

$$\hat{\mu}_1 = (\hat{x}_5)^{(1)}; \hat{\mu}_2 = (\hat{x}_6, \hat{x}_7)^{(2)}; \hat{\mu}_3 = (\hat{x}_6, \hat{x}_9, \hat{x}_8)^{(3)}; \hat{\nu}_1 = (\hat{\mu}_1, \hat{\mu}_2, \hat{\mu}_3)^{(2)}, \quad (4)$$

где \$(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n)^{(m)}\$ – логическое сочетание \$n\$ логических переменных по \$m\$, равно единице тогда и только тогда, когда число логических переменных, равных единице, равно \$m\$ или более [11]; \$\hat{x}_s \in \{1, 0\}\$ – логическая переменная, описывающая состояние элемента системы с номером \$s\$; \$\hat{\mu}_i \in \{1, 0\}\$ – логическая переменная, описывающая состояние \$i\$-го маршрута; \$\hat{\nu}_j \in \{1, 0\}\$ – логическая переменная, описывающая состояние \$j\$-й двухполюсной сети связи.

На втором этапе, используя понятие композиции функций из ТМ и выражение [11]

$$(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n)^{(m)} = \bigvee_{i_{m-1}=1}^{n-[m-1]} \hat{x}_{i_{m-1}} \wedge \left[\bigvee_{i_{m-2}=i_{m-1}+1}^{n-[m-2]} \hat{x}_{i_{m-2}} \wedge \left[\dots \wedge \left[\bigvee_{i_{m-m}=i_{m-m+1}+1}^{n-[m-m]} \hat{x}_{i_{m-m}} \right] \dots \right] \right],$$

осуществляется преобразование логических функций вида (4) в дизъюнктивную нормальную форму:

$$\begin{aligned} \hat{\mu}_1 &= \hat{x}_5; \hat{\mu}_2 = \hat{x}_6 \wedge \hat{x}_7; \hat{\mu}_3 = \hat{x}_6 \wedge \hat{x}_9 \wedge \hat{x}_8; \\ \hat{\nu}_1 &= (\hat{\mu}_1 \wedge \hat{\mu}_2) \vee (\hat{\mu}_1 \wedge \hat{\mu}_3) \vee (\hat{\mu}_2 \wedge \hat{\mu}_3) = \\ &= (\hat{x}_5 \wedge \hat{x}_6 \wedge \hat{x}_7) \vee (\hat{x}_5 \wedge \hat{x}_6 \wedge \hat{x}_9 \wedge \hat{x}_8) \vee (\hat{x}_6 \wedge \hat{x}_7 \wedge \hat{x}_9 \wedge \hat{x}_8) = \\ &= (\hat{x}_5 \wedge \hat{x}_6 \wedge \hat{x}_7) \vee (\hat{x}_5 \wedge \hat{x}_6 \wedge \hat{x}_9 \wedge \hat{x}_8) \vee (\hat{x}_6 \wedge \hat{x}_7 \wedge \hat{x}_9 \wedge \hat{x}_8). \end{aligned}$$

Таким образом, теоретико-множественное представление является наглядным и конструктивным базисом математического моделирования элементов ИММС.

Вероятностные функции, применяемые для анализа вероятности работоспособного состояния иерархических многоуровневых маршрутизирующих систем

Для дальнейшего решения задачи анализа вероятности работоспособного состояния ИММС необходимо отметить, что в контексте настоящего исследования значения коэффициента готовности логического объекта (логического соединения, коммутационного соединения и маршрута) и вероятности работоспособного состояния логического объекта (логического соединения, коммутационного соединения и маршрута) численно совпадают. Кроме того, значения коэффициента готовности ДСС (МСС), вероятности работоспособного состояния ДСС (МСС) и вероятности связности ДСС (МСС) численно совпадают.

Пусть множество вероятностей работоспособного состояния (ВРС) элементов ИКС определяется следующим образом:

$$PR = \{pr \mid (pr \in \mathbf{R}) \wedge (0 \leq pr \leq 1)\}.$$

Отсюда ВРС логического объекта, логического соединения, коммутационного соединения и т.д. можно определить как соответствие между заданным множеством ($A_n, LC_{n-1,s,k}, WC_{n,s,k}, M_n, Y_n$ или W_n) и множеством PR в следующем виде:

$$\begin{aligned} (A_n, PR, PRA_n) &\Leftrightarrow A_n \xrightarrow{PRA_n} PR; \\ (LC_{n-1,s,k}, PR, PRLC_{n-1,s,k}) &\Leftrightarrow LC_{n-1,s,k} \xrightarrow{PRLC_{n-1,s,k}} PR; \\ (WC_{n,s,k}, PR, PRWC_{n,s,k}) &\Leftrightarrow WC_{n,s,k} \xrightarrow{PRWC_{n,s,k}} PR; \\ (M_n, PR, PRM_n) &\Leftrightarrow M_n \xrightarrow{PRM_n} PR; \\ (Y_n, PR, PRY_n) &\Leftrightarrow Y_n \xrightarrow{PRY_n} PR; \\ (W_n, PR, PRW_n) &\Leftrightarrow W_n \xrightarrow{PRW_n} PR, \end{aligned}$$

где $PRA_n = \{ \dots, pra_l^{(n)}, \dots \}$ – подмножество множества кортежей из двух элементов $pra_l^{(n)} = (a_j^{(n)}, pr_g)$, включающих адрес логического объекта n -го уровня $a_j^{(n)}$ и его ВРС pr_g ;
 $PRLC_{n-1,s,k} = \{ \dots, prlc_l^{(n-1,s,k)}, \dots \}$ – подмножество множества кортежей из двух элементов $prlc_l^{(n-1,s,k)} = (lc_j^{(n-1,s,k)}, pr_g)$, включающих логическое соединение $(n-1)$ -го уровня $lc_j^{(n-1,s,k)}$ и его ВРС pr_g ;
 $PRWC_{n,s,k} = \{ \dots, prwc_l^{(n,s,k)}, \dots \}$ – подмножество множества кортежей из двух элементов $prwc_l^{(n,s,k)} = (wc_j^{(n,s,k)}, pr_g)$, включающих коммутационное соединение n -го уровня $wc_j^{(n,s,k)}$ и его ВРС pr_g ;
 $PRM_n = \{ \dots, prml^{(n)}, \dots \}$ – подмножество множества кортежей из двух элементов $prml^{(n)} = (\mu_{a_l^{(n)}, a_j^{(n)}, RT_{n,h,hl}}^{(n)}, pr_g)$, включающих маршрут соединения «точка-точка» между логическим объектом с адресом $a_l^{(n)}$ n -го уровня и логическим объектом $a_j^{(n)}$ того же уровня, полученный на основании таблицы маршрутизации соединений «точка-точка» $RT_{n,h}$ того же уровня $\mu_{a_l^{(n)}, a_j^{(n)}, RT_{n,h,hl}}^{(n)}$ и его ВРС pr_g ;
 $PRY_n = \{ \dots, pryl^{(n)}, \dots \}$ – подмножество множества кортежей из двух элементов $pryl^{(n)} = (\nu_{a_l^{(n)}, a_j^{(n)}, hl}^{(n)}, pr_g)$, включающих ДСС между логическим объектом с адресом $a_l^{(n)}$ n -го уровня и логическим объектом $a_j^{(n)}$ того же уровня $\nu_{a_l^{(n)}, a_j^{(n)}, hl}^{(n)}$ и ее ВРС pr_g ;
 $PRW_n = \{ \dots, prwl^{(n)}, \dots \}$ – подмножество множества кортежей из двух элементов $prwl^{(n)} = (w_{k,hl}^{(n)}, pr_g)$, включающих МСС между заданной группой логических объектов n -го уровня $w_{k,hl}^{(n)}$ и ее ВРС pr_g .

Под вероятностной функцией далее будет пониматься вероятность истинности логической функции [2]. Так, вероятностная функция, связывающая ВРС логических объектов n -го уровня, ВРС логических соединений «точка-точка» $(n-1)$ -го уровня, ВРС коммутационных соединений «точка-точка» n -го уровня с ВРС маршрутов соединений «точка-точка» n -го уровня – это соответствие следующего вида:

$$\begin{aligned} (\mathbf{PRA}_n, \mathbf{PRLC}_{n-1,1,1}, \mathbf{PRWC}_{n,1,1}, \mathbf{PRM}_n, \mathbf{PRALCWC}_n) &\Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow \mathbf{PRA}_n \times \mathbf{PRLC}_{n-1,1,1} \times \mathbf{PRWC}_{n,1,1} \xrightarrow{\mathbf{PRALCWC}_n} \mathbf{PRM}_n, \end{aligned}$$

где $\mathbf{PRA}_n = \{ \dots, PRA_{n,l}, \dots \}$ – множество различных вариантов ВРС логических объектов n -го уровня;
 $\mathbf{PRLC}_{n-1,1,1} = \{ \dots, PRLC_{n-1,1,1,h}, \dots \}$ – множество различных вариантов ВРС логических соединений «точка-точка» $(n-1)$ -го уровня;
 $\mathbf{PRWC}_{n,1,1} = \{ \dots, PRWC_{n,1,1,g}, \dots \}$ – множество различных вариантов ВРС коммутационных соединений «точка-точка» n -го уровня;
 $\mathbf{PRM}_n = \{ \dots, PRM_{n,t}, \dots \}$ – множество различных

вариантов ВРС маршрутов соединений «точка-точка» n -го уровня; $PRALCWCМ_n = \{ \dots, pralcwcm_q^{(n)}, \dots \}$ – подмножество множества кортежей из четырех элементов $pralcwcm_q^{(n)} = (PRA_{n,t}, PRLC_{n-1,1,h}, PRWC_{n,1,g}, PRM_{n,t})$, включающих ВРС логических объектов n -го уровня $PRA_{n,t}$, ВРС логических соединений «точка-точка» $(n-1)$ -го уровня $PRLC_{n-1,1,h}$, ВРС коммутационных соединений «точка-точка» n -го уровня $PRWC_{n,1,g}$ и ВРС маршрутов соединений «точка-точка» n -го уровня $PRM_{n,t}$, взаимосвязанных с помощью указанного соответствия.

Вероятностная функция, связывающая ВРС маршрутов соединений «точка-точка» n -го уровня с ВРС двухполюсных сетей связи n -го уровня – это соответствие следующего вида:

$$\begin{aligned} (\mathbf{PRM}_n, \mathbf{PRY}_n, \mathbf{PRMY}_n) &\Leftrightarrow \mathbf{PRM}_n \xrightarrow{\mathbf{PRMY}_n} \mathbf{PRY}_n = \\ &= \mathbf{PRA}_n \times \mathbf{PRLC}_{n-1,1} \times \mathbf{PRWC}_{n,1} \xrightarrow{\mathbf{PRMY}_n \circ \mathbf{PRALCWCМ}_n} \mathbf{PRY}_n, \end{aligned}$$

где $\mathbf{PRY}_n = \{ \dots, PRY_{n,t}, \dots \}$ – множество различных вариантов ВРС двухполюсных сетей связи n -го уровня; $\mathbf{PRMY}_n = \{ \dots, prmy_q^{(n)}, \dots \}$ – подмножество множества кортежей из двух элементов $prmy_q^{(n)} = (PRM_{n,g}, PRY_{n,t})$, включающих ВРС маршрутов соединений «точка-точка» n -го уровня $PRM_{n,g}$, ВРС двухполюсных сетей связи n -го уровня $PRY_{n,t}$, взаимосвязанных с помощью предложенного соответствия.

Вероятностная функция, связывающая ВРС двухполюсных сетей связи n -го уровня с ВРС многополюсных сетей связи n -го уровня – это соответствие следующего вида:

$$\begin{aligned} (\mathbf{PRY}_n, \mathbf{PRW}_n, \mathbf{PRYW}_n) &\Leftrightarrow \mathbf{PRY}_n \xrightarrow{\mathbf{PRYW}_n} \mathbf{PRW}_n = \\ &= \mathbf{PRA}_n \times \mathbf{PRLC}_{n-1,1} \times \mathbf{PRWC}_{n,1} \xrightarrow{\mathbf{PRYW}_n \circ \mathbf{PRMY}_n \circ \mathbf{PRALCWCМ}_n} \mathbf{PRW}_n, \end{aligned}$$

где $\mathbf{PRW}_n = \{ \dots, PRW_{n,t}, \dots \}$ – множество различных вариантов ВРС многополюсных сетей связи n -го уровня; $\mathbf{PRYW}_n = \{ \dots, pryw_q^{(n)}, \dots \}$ – подмножество множества кортежей из двух элементов $pryw_q^{(n)} = (PRY_{n,g}, PRW_{n,t})$, включающих ВРС двухполюсных сетей связи n -го уровня $PRY_{n,g}$, ВРС многополюсных сетей связи n -го уровня $PRW_{n,t}$, взаимосвязанных с помощью представленного соответствия.

Решение задачи анализа вероятности работоспособного состояния иерархических многоуровневых маршрутизирующих систем

Результатом анализа надежности ИММС должно стать получение количественных значений показателей безотказности. Для этого используются логические функции, допускающие непосредственный переход к вероятностным функциям путем замены всех логических переменных соответствующими вероятностями, а всех логических операций – соответствующими арифметическими операциями [2]. В настоящее время применяется целый ряд форм перехода к полному замещению:

- совершенная дизъюнктивная нормальная форма;
- ортогональная дизъюнктивная нормальная форма;
- бесповторные логические функции в базе конъюнкция–отрицание [2].

Для сокращения дальнейших записей элементы (N) -го уровня эталонной модели взаимосвязи открытых систем (ВОС) далее будут обозначаться как (N) -элементы. Например, логический объект (N) -го уровня ВОС – (N) -логический объект¹.

На рис. 2 представлено стратифицированное в теоретико-множественном базисе описание свойства надежности, и выделены следующие взаимосвязи:

- свойств (N) -логических объектов, свойств $(N-1)$ -логических соединений и свойств (N) -коммутационных соединений;
- свойств (N) -маршрутов соединений «точка-точка»;
- свойств (N) -двухполюсных сетей связи;
- свойств (N) -многополюсных сетей связи.

¹ ГОСТ Р ИСО/МЭК 7498-1-99 Информационная технология. Взаимосвязь открытых систем. Базовая эталонная модель. Часть 1. Базовая модель.

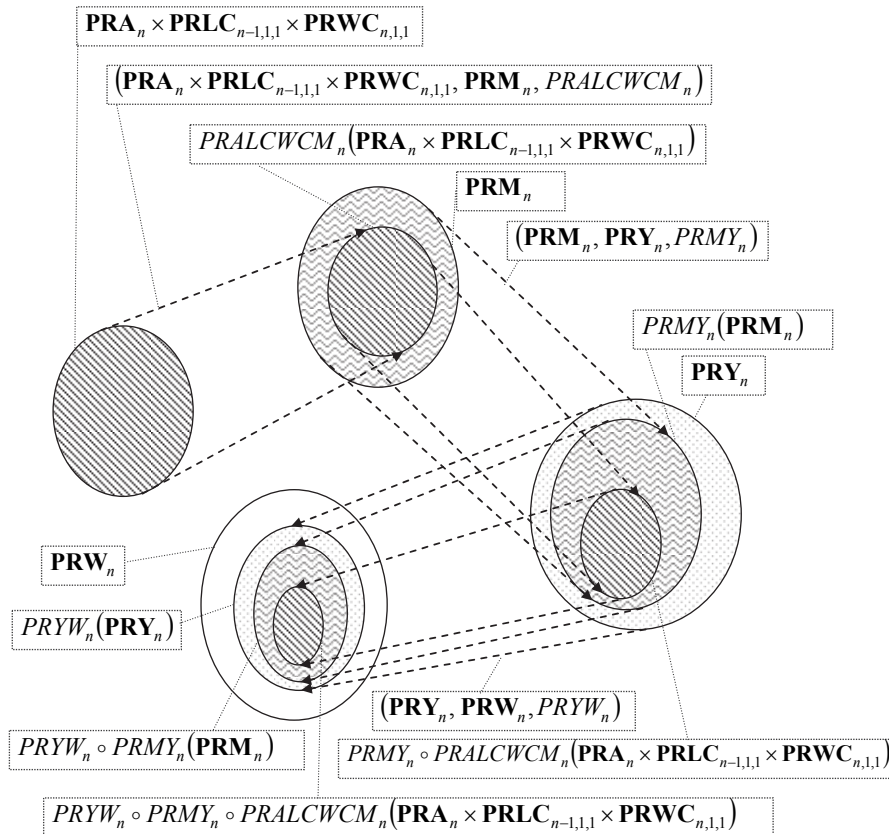


Рис. 2. Стратифицированное описание свойства надежности иерархических многоуровневых маршрутизирующих систем в рамках эталонной модели взаимосвязи открытых систем

Для решения задачи определения ВРС ниже осуществляется ортогонализация с последующим полным замещением [2], т.е. соответствие между рассмотренными выше логическими и вероятностными функциями:

$$\begin{aligned}
 & (\mathbf{LFSTALCWCM}_n, \mathbf{PRALCWCM}_n, \mathbf{ORLFSTPRALCWCM}_n) \Leftrightarrow \\
 & \Leftrightarrow \mathbf{LFSTALCWCM}_n \xrightarrow{\mathbf{ORLFSTPRALCWCM}_n} \mathbf{PRALCWCM}_n, \\
 & (\mathbf{LFSTMY}_n, \mathbf{PRMY}_n, \mathbf{ORLFSTPRMY}_n) \Leftrightarrow \\
 & \Leftrightarrow \mathbf{LFSTMY}_n \xrightarrow{\mathbf{ORLFSTPRMY}_n} \mathbf{PRMY}_n, \\
 & (\mathbf{LFSTYW}_n, \mathbf{PRYW}_n, \mathbf{ORLFSTPRYW}_n) \Leftrightarrow \\
 & \Leftrightarrow \mathbf{LFSTYW}_n \xrightarrow{\mathbf{ORLFSTPRYW}_n} \mathbf{PRYW}_n,
 \end{aligned}$$

где $\mathbf{LFSTALCWCM}_n = \{ \dots, \mathbf{LFSTALCWCM}_{n,l}, \dots \}$ – множество различных вариантов логической функции, связывающей состояния логических объектов n -го уровня, состояния логических соединений «точка-точка» $(n-1)$ -го уровня, состояния коммутационных соединений «точка-точка» n -го уровня с состояниями маршрутов соединений «точка-точка» n -го уровня; $\mathbf{PRALCWCM}_n = \{ \dots, \mathbf{PRALCWCM}_{n,j}, \dots \}$ – множество различных вариантов вероятностной функции, связывающей ВРС логических объектов n -го уровня, ВРС логических соединений «точка-точка» $(n-1)$ -го уровня, ВРС коммутационных соединений «точка-точка» n -го уровня с ВРС маршрутов соединений «точка-точка» n -го уровня; $\mathbf{LFSTMY}_n = \{ \dots, \mathbf{LFSTMY}_{n,l}, \dots \}$ – множество различных вариантов логической функции, связывающей состояния маршрутов соединений «точка-точка» n -го уровня с состояниями ДСС n -го уровня; $\mathbf{PRMY}_n = \{ \dots, \mathbf{PRMY}_{n,j}, \dots \}$ – множество различных вариантов вероятностной функции, связывающей ВРС маршрутов соединений «точка-точка» n -го уровня с ВРС двухполюсных сетей связи n -го уровня; $\mathbf{LFSTYW}_n = \{ \dots, \mathbf{LFSTYW}_{n,l}, \dots \}$ – множество различных вариантов логической функции, связывающей

состояния ДСС n -го уровня с состояниями МСС n -го уровня; $PRYW_n = \{ \dots, PRYW_{n,l}, \dots \}$ – множество различных вариантов вероятностной функции, связывающей ВРС двухполюсных сетей связи n -го уровня с ВРС многополюсных сетей связи n -го уровня; $ORLFSTPRALCWCWCM_n = \{ \dots, orlfstpralcwcm_k^{(n)}, \dots \}$ – подмножество множества кортежей из двух элементов $orlfstpralcwcm_k^{(n)} = (LFSTALCWCWCM_{n,l}, PRALCWCWCM_{n,l})$, включающих логическую функцию, связывающую состояния логических объектов n -го уровня, состояния логических соединений «точка-точка» $(n-1)$ -го уровня, состояния коммутационных соединений «точка-точка» n -го уровня с состояниями маршрутов соединений «точка-точка» n -го уровня, и вероятностную функцию, связывающую ВРС логических объектов n -го уровня, ВРС логических соединений «точка-точка» $(n-1)$ -го уровня, ВРС коммутационных соединений «точка-точка» n -го уровня с ВРС маршрутов соединений «точка-точка» n -го уровня; $ORLFSTPRMY_n = \{ \dots, orlfstprmy_k^{(n)}, \dots \}$ – подмножество множества кортежей из двух элементов $orlfstprmy_k^{(n)} = (LFSTMY_{n,l}, PRMY_{n,l})$, включающих логическую функцию, связывающую состояния маршрутов соединений «точка-точка» n -го уровня с состояниями ДСС n -го уровня, и вероятностную функцию, связывающую ВРС маршрутов соединений «точка-точка» n -го уровня с ВРС двухполюсных сетей связи n -го уровня; $ORLFSTPRYW_n = \{ \dots, orlfstpryw_k^{(n)}, \dots \}$ – подмножество множества кортежей из двух элементов $orlfstpryw_k^{(n)} = (LFSTYW_{n,l}, PRYW_{n,l})$, включающих логическую функцию, связывающую состояния ДСС n -го уровня с состояниями МСС n -го уровня и вероятностную функцию, связывающую ВРС двухполюсных сетей связи n -го уровня с ВРС многополюсных сетей связи n -го уровня.

Для получения решения конкретной задачи количественной оценки ВРС требуется преобразование дизъюнктивной нормальной формы (ДНФ) в ортогональную дизъюнктивную нормальную форму (ОДНФ). Для этого целесообразно использовать алгоритм построения усеченного дерева событий в глубину, включающий следующие этапы [12].

1. В анализируемой ДНФ определяется конъюнкция с наименьшим числом элементов, и строится ветвь усеченного дерева событий, описывающая состояние работоспособности.
2. Определяется крайний правый работоспособный элемент последней ветви, если такого элемента нет, тогда работа алгоритма заканчивается.
3. Формируется новая ветвь усеченного дерева событий за счет перевода найденного элемента в неработоспособное состояние.
4. На основании исходной ДНФ формируется временная ДНФ путем исключения из исходной ДНФ тех конъюнкций, в составе которых есть неработоспособные элементы из последней ветви.
5. Если временная ДНФ не содержит ни одной конъюнкции, тогда последняя ветвь описывает неработоспособное состояние. Если же в новой ДНФ имеется хотя бы одна конъюнкция, тогда с помощью последней ветви и конъюнкции с наименьшим числом элементов формируется ветвь усеченного дерева событий, описывающая работоспособное состояние (при этом каждая переменная может быть использована только один раз).
6. Возврат ко второму этапу.

Ниже работа данного алгоритма иллюстрируется на примере простой ИКС, заданной графом, представленным на рис. 1, и следующей логической функцией:

$$\hat{v}_1 = (\hat{x}_5 \wedge \hat{x}_6 \wedge \hat{x}_7) \vee (\hat{x}_5 \wedge \hat{x}_6 \wedge \hat{x}_9 \wedge \hat{x}_8) \vee (\hat{x}_6 \wedge \hat{x}_7 \wedge \hat{x}_9 \wedge \hat{x}_8),$$

где $\hat{x}_s \in \{1, 0\}$ – случайная величина, описывающая состояние элемента системы с номером s (работоспособное или неработоспособное); $\overline{\hat{x}_s}$ – работоспособное состояние s -го элемента, другими словами, $\hat{x}_s = 1$; \hat{x}_s – неработоспособное состояние s -го элемента, другими словами $\hat{x}_s = 0$; $\hat{v}_i \in \{1, 0\}$ – случайная величина, описывающая состояние i -й двухполюсной сети связи; $\overline{\hat{v}_i}$ – работоспособное состояние i -й ДСС, другими словами $\hat{v}_i = 1$; \hat{v}_i – неработоспособное состояние i -й ДСС, другими словами $\hat{v}_i = 0$.

Шаг 1. Этап 1. В исходной ДНФ определяется конъюнкция с наименьшим числом элементов. Это $\hat{x}_5 \wedge \hat{x}_6 \wedge \hat{x}_7$.

Строится ветвь усеченного дерева событий (рис. 3).

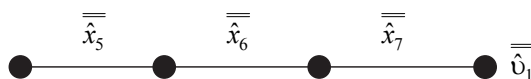


Рис. 3. Усеченное дерево событий (шаг 1)

Шаг 2. Этап 2–3. Определяется крайний правый работоспособный элемент последней ветви $\overline{\hat{x}}_7$, и формируется новая ветвь усеченного дерева событий за счет перевода найденного элемента в неработоспособное состояние $\overline{\hat{x}}_7$ (рис. 4).

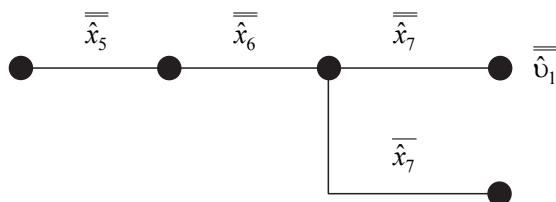


Рис. 4. Усеченное дерево событий (шаг 2)

Шаг 3. Этап 4. На основании исходной ДНФ формируется временная ДНФ путем исключения из исходной ДНФ тех конъюнкций, в составе которых есть неработоспособный элемент $\overline{\hat{x}}_7$ из последней ветви:

$$\hat{v}_1^* = \hat{x}_5 \wedge \hat{x}_6 \wedge \hat{x}_9 \wedge \hat{x}_8.$$

Шаг 4. Этап 5. С помощью последней ветви и конъюнкции с наименьшим числом элементов формируется ветвь усеченного дерева событий (рис. 5), описывающая работоспособное состояние (при этом каждая переменная может быть использована только один раз).

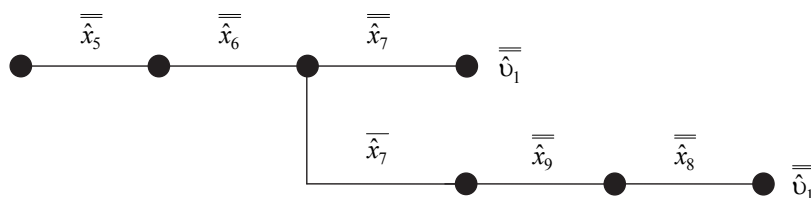


Рис. 5. Усеченное дерево событий (шаг 4)

Шаг 5. Этап 2–3. Определяется крайний правый работоспособный элемент последней ветви $\overline{\hat{x}}_8$ и формируется новая ветвь усеченного дерева событий за счет перевода найденного элемента в неработоспособное состояние $\overline{\hat{x}}_8$ (рис. 6).

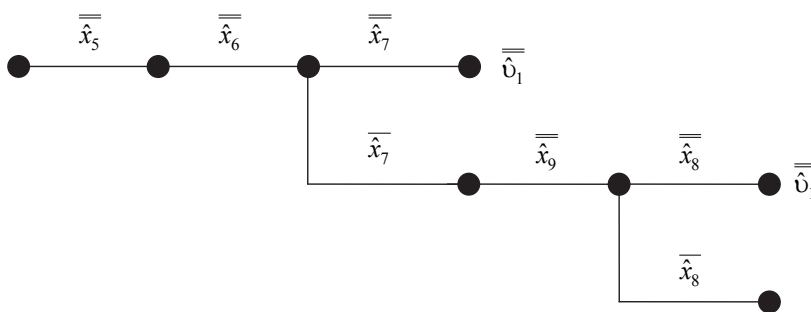


Рис. 6. Усеченное дерево событий (шаг 5)

Шаг 6. Этап 4. На основании исходной ДНФ формируется временная ДНФ путем исключения из исходной ДНФ тех конъюнкций, в составе которых есть неработоспособные элементы $\overline{\hat{x}}_7$ и $\overline{\hat{x}}_8$ из последней ветви:

$$\hat{v}_1^* = \emptyset. \tag{5}$$

Шаг 7. Этап 5. Временная ДНФ не содержит ни одной конъюнкции, следовательно, последняя ветвь описывает неработоспособное состояние.

Шаг 8. Этап 2–3. Определяется крайний правый работоспособный элемент последней ветви $\overline{\hat{x}}_9$ и формируется новая ветвь усеченного дерева событий, за счет перевода найденного элемента в неисправное состояние $\overline{\hat{x}}_9$ (рис. 7).

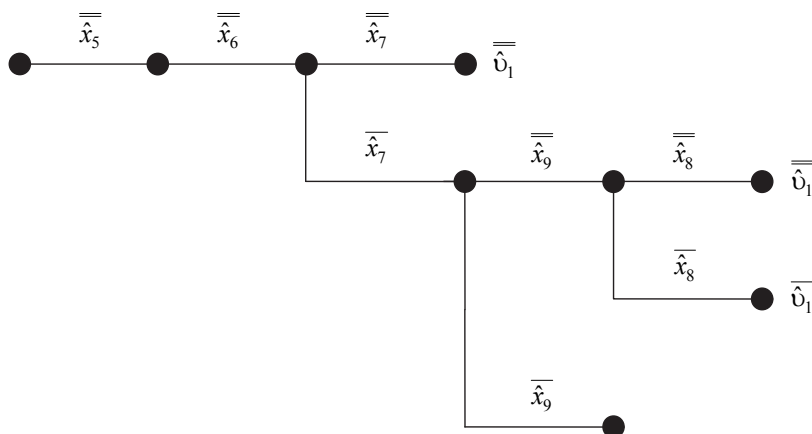


Рис. 7. Усеченное дерево событий (шаг 8)

Шаг 8. Этап 4. На основании исходной ДНФ формируется временная ДНФ путем исключения из исходной ДНФ тех конъюнкций, в составе которых есть неработоспособные элементы \hat{x}_7 и \hat{x}_9 из последней ветви (5).

Шаг 9. Этап 5. Временная ДНФ не содержит ни одной конъюнкции, следовательно, последняя ветвь описывает неработоспособное состояние.

Шаг 10. Этап 2–3. Определяется крайний правый работоспособный элемент последней ветви \hat{x}_6 и формируется новая ветвь усеченного дерева событий, за счет перевода найденного элемента в неработоспособное состояние \hat{x}_6 (рис. 8).

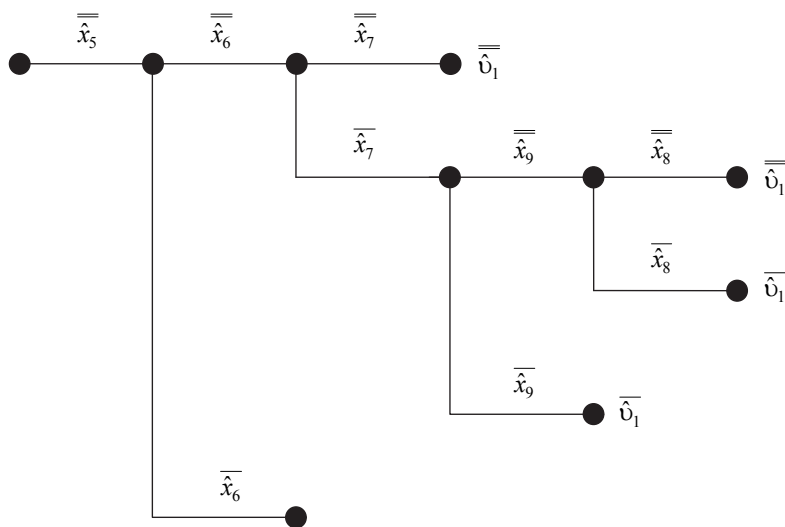


Рис. 8. Усеченное дерево событий (шаг 10)

Шаг 11. Этап 4. На основании исходной ДНФ формируется временная ДНФ путем исключения из исходной ДНФ тех конъюнкций, в составе которых есть неработоспособный элемент \hat{x}_6 из последней ветви (выражение (5)).

Шаг 12. Этап 5. Временная ДНФ не содержит ни одной конъюнкции, следовательно, последняя ветвь описывает неработоспособное состояние.

По окончании работы алгоритма получается усеченное дерево событий, представленное на рис. 9.

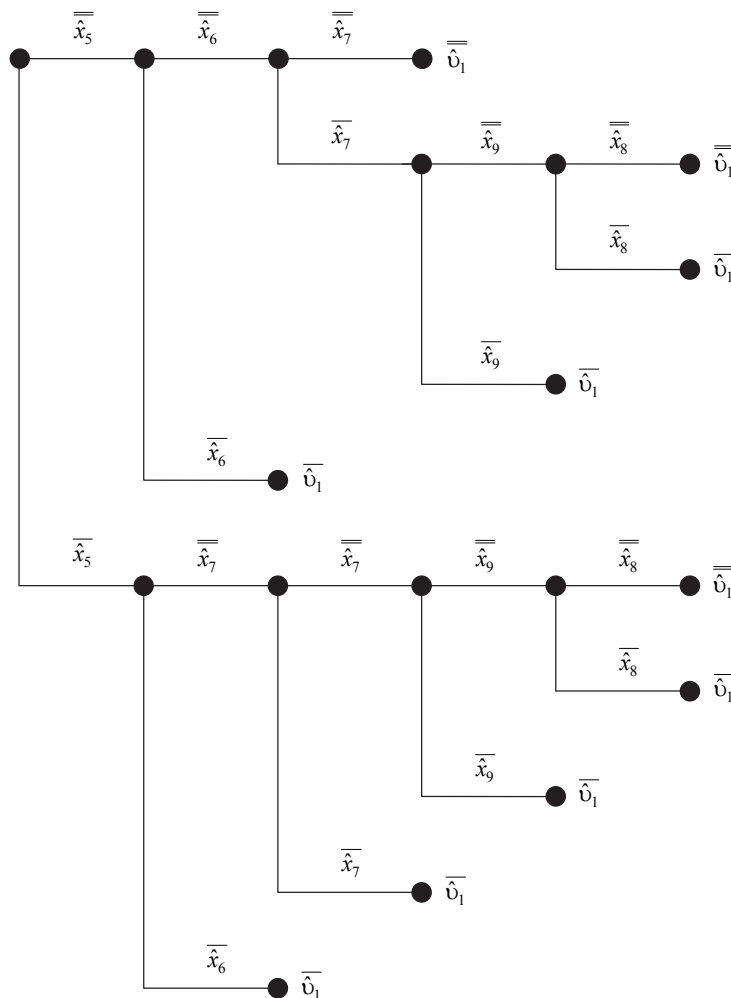


Рис. 9. Усеченное дерево событий (заключительный шаг)

На его основании можно записать логическую функцию в ОДНФ, которая связывает состояние отдельных элементов системы с состоянием ИКС:

$$\hat{v}_1 = (\overline{\hat{x}_5} \wedge \overline{\hat{x}_6} \wedge \overline{\hat{x}_7}) \vee (\overline{\hat{x}_5} \wedge \overline{\hat{x}_6} \wedge \overline{\hat{x}_7} \wedge \overline{\hat{x}_9} \wedge \overline{\hat{x}_8}) \vee (\overline{\hat{x}_5} \wedge \overline{\hat{x}_6} \wedge \overline{\hat{x}_7} \wedge \overline{\hat{x}_9} \wedge \overline{\hat{x}_8}). \quad (6)$$

Для решения задачи преобразования ОДНФ в вероятностную функцию, необходимо определить два множества,

$$Z_1 = \left\{ \left\{ \dots, \overline{\hat{x}_s}, \dots \right\}, \left\{ \dots, \hat{x}_s, \dots \right\}, \wedge, \vee \right\},$$

$$Z_2 = \left\{ \left\{ \dots, p(\overline{\hat{x}_s}), \dots \right\}, \left\{ \dots, p(\hat{x}_s), \dots \right\}, \times, + \right\}$$

и соответствие

$$FR \subseteq Z_1 \times Z_2 \Leftrightarrow (Z_1, Z_2, FR) \Leftrightarrow Z_1 \xrightarrow{FR} Z_2 \Leftrightarrow FR : Z_1 \rightarrow Z_2,$$

заданное на этих множествах, где

$$FR = \left\{ \left(\left\{ \dots, \overline{\hat{x}_s}, \dots \right\}, \left\{ \dots, p(\overline{\hat{x}_s}), \dots \right\} \right), \left(\left\{ \dots, \hat{x}_s, \dots \right\}, \left\{ \dots, p(\hat{x}_s), \dots \right\} \right), (\wedge, \times), (\vee, +) \right\},$$

$p(\overline{\hat{x}_s})$ – вероятность нахождения s -го элемента сети связи в работоспособном состоянии, другими словами, $p(\hat{x}_s = 1)$; $p(\hat{x}_s)$ – вероятность нахождения s -го элемента сети связи в неработоспособном состоянии, другими словами, $p(\hat{x}_s = 0)$; $p(\overline{\hat{v}_i})$ – вероятность нахождения i -й ДСС в работоспособном состоянии,

нии, другими словами, $p(\hat{v}_i = 1)$; $p(\overline{\hat{v}_i})$ – вероятность нахождения i -й ДСС в неработоспособном состоянии, другими словами, $p(\hat{v}_i = 0)$.

Таким образом, задача преобразования ОДНФ в вероятностную функцию – это нахождение образов элементов множества Z_1 во множестве Z_2 , используя соответствие FR . Ниже представлен пример преобразования ОДНФ в вероятностную функцию, характеризующую двухполюсную сеть ИКС (рис. 1) с использованием выражения (6):

$$\begin{aligned} & \left(\overline{\hat{x}_5} \wedge \overline{\hat{x}_6} \wedge \overline{\hat{x}_7} \right) \vee \left(\overline{\hat{x}_5} \wedge \overline{\hat{x}_6} \wedge \overline{\hat{x}_7} \wedge \overline{\hat{x}_9} \wedge \overline{\hat{x}_8} \right) \vee \left(\overline{\hat{x}_5} \wedge \overline{\hat{x}_6} \wedge \overline{\hat{x}_7} \wedge \overline{\hat{x}_9} \wedge \overline{\hat{x}_8} \right) \xrightarrow{FR} \\ & \xrightarrow{FR} p(\overline{\hat{x}_5}) \cdot p(\overline{\hat{x}_6}) \cdot p(\overline{\hat{x}_7}) + p(\overline{\hat{x}_5}) \cdot p(\overline{\hat{x}_6}) \cdot (1 - p(\overline{\hat{x}_7})) \cdot p(\overline{\hat{x}_9}) \cdot p(\overline{\hat{x}_8}) + \\ & + (1 - p(\overline{\hat{x}_5})) \cdot p(\overline{\hat{x}_6}) \cdot p(\overline{\hat{x}_7}) \cdot p(\overline{\hat{x}_9}) \cdot p(\overline{\hat{x}_8}). \end{aligned} \quad (7)$$

Получение значения ВРС двухполюсной сети ИКС из выражения (7) не представляет затруднений. Следовательно, предложенный выше инструментарий позволяет наглядно и конструктивно получить количественное значение показателей безотказности двухполюсной сети связи ИКС, представленной графом на рис. 1, в которой статические маршруты известны, а условие работоспособности заданы вербально («два из трех»).

Заключение

Предложенный в работе композиционный метод исследования позволяет системно решать задачи анализа надежности иерархических многоуровневых маршрутизирующих систем. На примере решения задачи определения вероятности работоспособного состояния конкретной инфокоммуникационной системы было показано, что этот метод представляет собой композицию методов теории графов, математической логики и теории вероятностей, системно связанных и согласованных друг с другом через единое теоретико-множественное представление объекта исследования. При этом математическое моделирование иерархических многоуровневых маршрутизирующих систем базируется на иерархической системе моделей, каждая из которых отражает объект исследования на различных уровнях абстрагирования (стратах). Различаются два направления иерархии:

- иерархия по вертикали, в которой деление моделей по уровням (стратам) осуществляется в зависимости от структурно-функциональных особенностей иерархических многоуровневых маршрутизирующих систем [8];
- иерархия по горизонтали (рис. 2), в которой деление моделей по уровням осуществляется в зависимости от объекта моделирования (соединение, маршрут, двухполюсная сеть связи или многополюсная сеть связи).

В ходе проведенных исследований на примере инфраструктурного объекта было продемонстрировано, что данный подход дает возможность математически строго сформулировать как основные понятия, так и получаемые результаты исследований иерархических многоуровневых маршрутизирующих систем, получить ряд строго сформулированных понятий относительно элементов и свойств систем, которые прежде могли быть описаны лишь на вербальном уровне [13]. Применение теории множеств с первого до последнего этапа анализа позволило зафиксировать систему исходных данных и контролировать всю последовательность процедур их использования при решении конкретных задач. При этом появляется возможность использования полученных формализмов и атрибутов в качестве формального языка описания иерархических многоуровневых маршрутизирующих систем в современных средствах автоматизации управления.

Направлением дальнейших исследований в предметной области является использование системы формализмов, предложенной в настоящей работе, для решения конкретных задач синтеза (оптимизации) иерархических многоуровневых маршрутизирующих систем, традиционно представляемых в базисах теории графов, теории массового обслуживания и теории надежности [14, 15].

Литература

1. Кузьменко Г.Н., Кузнецов В.В., Чудинов С.М. Принципы построения и методы оценки надежности мультисервисных сетей. Белгород: БелГУ, 2005. 223 с.
2. Рябинин И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. СПб.: Политехника, 2000. 248 с.
3. Манов Н.А., Хохлов М.В., Чукреев Ю.Я. и др. Методы и модели исследования надежности электроэнергетических систем. Сыктывкар: Коми НЦ УрО РАН, 2010. 292 с.
4. Халлыев Н.Х. Методология поддержания и повышения

References

1. Kuz'menko G.N., Kuznetsov V.V., Chudinov S.M. *Printsipy Postroeniya i Metody Otsenki Nadezhnosti Mul'tiservisnykh Setei* [Principles and Methods for Evaluating the Reliability of Multi-Service Networks]. Belgorod, BelSU Publ., 2005, 223 p.
2. Ryabinin I.A. *Nadezhnost' i Bezopasnost' Strukturno-Slozhnykh Sistem* [Reliability and Security of Structurally Complex Systems]. St. Petersburg, Politekhnik Publ., 2000, 248 p.
3. Manov N.A., Khokhlov M.V., Chukreev Yu.Ya. et. al. *Metody i Modeli Issledovaniya Nadezhnosti Elektro-Energeticheskikh*

- эксплуатационной надежности и безопасности линейной части магистральных газопроводов // Газовая промышленность. 2005. №2.
5. Kuhn D.R. Sources of failure in the public switched telephone network // *Computer*. 1997. V. 30. N 4. P. 31–36. doi: 10.1109/2.585151
 6. Попков В.К. Математические модели связности. 2-е изд. Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, 2006. 490 с.
 7. Takahara Y., Mesarovic M. *Organization Structure: Cybernetic Systems Foundation*. NY: Springer, 2012. 288 p.
 8. Трегубов Р.Б., Алексиков Ю.Г., Сaitov С.И. Представление иерархических многоуровневых маршрутизирующих систем в теоретико-множественном базисе // Труды СПИИРАН. 2016. № 3 (46). С. 139–168.
 9. Митрохин В.Е., Рингенблум П.Г. Влияние угроз функционирования мультисервисной сети как аспекта телекоммуникационной сети с линейной топологией // Доклады ТУСУР. 2010. №1 (21). С. 156–159.
 10. Мейкшан В.И., Белов В.М., Корчагин В.П. Оценка качества информационной безопасности на коэффициент готовности информационной безопасности // Вестник СибГУТИ. 2016. № 1. С. 74–82.
 11. Трегубов Р.Б., Сaitov И.А. Применение алгебры логики для формализации и решения задач анализа надежности структурно-сложных распределенных систем // Наукоедение. 2016. Т. 8. № 3.
 12. Перегуда А.И., Пovyaklo А.А. Методы расчета показателей надежности ЭВМ. Обнинск, ИАТЭ, 1996. 63 с.
 13. Захаров Г.П. Методы исследования сетей передачи данных. М.: Радио и связь, 1982. 208 с.
 14. Вишнеvский В.М., Леонов А.О., Левченко Н.Н., Степанов А.М. Оптимизация топологии сетей передачи информации большой размерности // Автоматика и телемеханика. 2007. № 5. С. 18–31.
 15. Попков В.К., Токтошов Г.Ы., Юргенсон А.Н. Об одном подходе к оптимизации инфраструктуры инженерных сетей // Вестник СибГУТИ. 2012. № 3. С. 11–28.
 16. Sitem [Methods and Models for Reliability Study of Electric Power Systems]. Syktyvkar, Komi Nauchnyi Tsentr Ural'skogo Otdeleniya RAS, 2010, 292 p.
 17. Khallyev N.Kh. Methodology of maintaining and operational reliability improving and safety of linear part of gas pipeline. *Gazovaya Promyshlennost'*, 2005, no. 2. (In Russian)
 18. Kuhn D.R. Sources of failure in the public switched telephone network. *Computer*, 1997, vol. 30, no. 4, pp. 31–36. doi: 10.1109/2.585151
 19. Popkov V.K. *Matematicheskie Modeli Svyaznosti* [Mathematical Models of Connectivity]. 2nd ed. Novosibirsk, IVM&MG SO RAS, 2006, 490 p.
 20. Takahara Y., Mesarovic M. *Organization Structure: Cybernetic Systems Foundation*. NY, Springer, 2012, 288 p.
 21. Tregubov R.B., Aleksikov Yu.G., Saitov S.I. Representation of the hierarchical multilayer routing systems in a set-theoretic base. *SPIIRAS Proceedings*, 2016, no. 3, pp. 139–168.
 22. Mitrokhin V.E., Ringenbljum P.G. Influence of threats of informational security on availability of a telecommunication network with linear topology. *Proceedings of TUSUR University*, 2010, no. 1, pp. 156–159.
 23. Meikshan V.I., Belov V.M., Korchagin V.P. Quality assessment of multiservice network performance as an aspect of information security. *Vestnik SibGUTI*, 2016, no. 1, pp. 74–82.
 24. Tregubov R.B., Saitov I.A. Application of Boolean algebra for formalization and the solution of tasks of analysis of reliability of structural and difficult distributed systems. *Naukovedenie*, 2016, vol. 8, no. 3, art. 57TVN316.
 25. Pereguda A.I., Povyaklo A.A. *Metody Rascheta Pokazatelei Nadezhnosti EVM* [Methods of Computer Reliability Calculating]. Obninsk, IATE, 1996, 63 p.
 26. Zakharov G.P. *Metody Issledovaniya Setei Peredachi Danykh* [Methods of Data Networks Research]. Moscow, Radio i Svyaz' Publ., 1982, 208 p.
 27. Vishnevskii V.M., Leonov A.O., Levchenko N.I., Stepanov A.M. Topological optimization of the large-scale data transmission networks. *Automation and Remote Control*, 2007, vol. 68, no. 5, pp. 760–772.
 28. Popkov V., Toktoshov G., Yurgenson A. One approach to networks infrastructure optimization. *Vestnik SibGUTI*, 2012, no. 3, pp. 11–28.

Автор

Трегубов Роман Борисович – кандидат технических наук, сотрудник, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации, Орел, 302034, Российская Федерация, treba@list.ru

Author

Roman B. Tregubov – PhD, researcher, Academy of Federal Guard Service of the Russian Federation, Orel, 302034, Russian Federation, treba@list.ru