

ОБОБЩЕННАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СТРУКТУРНОЙ НАДЕЖНОСТИ СЕТИ

В. Е. Гвоздев • М. Б. Гузаиров • А. С. Ракипова • Р. Р. Галимов

Аннотация. Функциональная надежность коммуникационных систем является критическим фактором эффективности решения задач сетевидного управления. Одной из задач организации информационного обмена в мобильной системе киберфизических устройств является сравнительный анализ альтернативных вариантов реализации топологии информационных коммуникаций между устройствами по комплексу показателей, включая структурную надежность. Концептуальной основой предлагаемого подхода является сведение задачи конструирования обобщенных показателей структурной надежности на основе частных топологических характеристик к использованию аппарата статистических индексов, в которых в качестве базовых констант используются значения показателей, соответствующих полностью связанной сети.

Ключевые слова: структурная надежность; сетевидное управление; группы киберфизических устройств; топология информационных коммуникаций; обобщенная характеристика, статистические индексы.

ВВЕДЕНИЕ

Функциональная надежность коммуникационных систем является критическим фактором эффективности решения задач сетевидного управления с использованием групп мобильных киберфизических устройств. В свою очередь структурная надежность является критическим фактором функциональной надежности, что обуславливает необходимость совершенствования методов оценивания структурной надежности коммуникационных систем групп мобильных объектов.

Одной из задач организации информационного обмена в мобильной системе киберфизических устройств является сравнительный анализ альтернативных вариантов реализации топологии информационных коммуникаций между устройствами по комплексу показателей, включая структурную надежность [1].

Надежность является одной из системных характеристик объекта управления, что обуславливает потребность разработки обобщенных характеристик на базе частных характеристик надежности. В [2] описан подход к построению комплексных характеристик надежности технических систем, именуемый «методом обобщенного параметра», и основанный на использовании совокупности различных измерительных параметров состояния. Сущность метода составляет аппарат статистических индексов, заключающийся в преобразовании измеряемых параметров к безразмерному виду, что создает основу для их последующих сверток, в том числе нелинейных. Одним из базовых вопросов метода является выбор базовых констант для получения относительных значений характеристических параметров, на основе которых вычисляются значения обобщенного параметра. В упомянутой работе рассматриваются различные варианты базовых констант, однако все они основаны на учете заранее определенных границ, при нахождении внутри которых технический объект считается работоспособным. Отмеченное обстоятельство препятствует механическому переносу метода обобщенного параметра для решения задач анализа структурной надежности систем информационной поддержки сетевидного управления, поскольку базовое требование к свойствам информационной системы, определенное в [3]: «...сохранять способность выполнять требуемые

функции в условиях воздействия внутренних дестабилизирующих факторов, то есть сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции...» в зависимости от ситуации может иметь различное смысловое содержание. Это обусловлено тем, что в зависимости от ситуации, в которой оказывается объект управления, функциональные возможности информационной системы могут иметь существенно различную значимость и соответственно характеризоваться разным уровнем требований к надежности их выполнения [4].

Другой особенностью задачи формирования обобщенного параметра применительно к задаче информационной поддержки сетцентрического управления является динамический характер физических топологий, что связано как с влиянием характеристик местности, так и с целенаправленным воздействием дестабилизирующих факторов [5].

Третьей особенностью является неоднозначность подходов к выбору структуры коммуникационной системы в силу многовариантности организации структуры информационного взаимодействия в группе мобильных объектов [1, 6, 7].

Концептуальной основой предлагаемого подхода является выбор базовых констант не на основе границ области работоспособного состояния (что в случае мобильных систем, функционирующих в динамично изменяющихся условиях, имеет многозначное содержание), а на основе топологических характеристик эталонной сети, в качестве которой выступает полносвязная сеть.

ФОРМИРОВАНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ОБОБЩЕННОГО ПОКАЗАТЕЛЯ СТРУКТУРНОЙ НАДЕЖНОСТИ

Основанием для выбора в качестве базовой константы значения топологических характеристик полносвязной сети с тем же числом узлов, что и исследуемая, обосновывается тем, что с точки зрения структурной надежности полносвязная сеть обладает наилучшими характеристиками [8]. Если исходить из того, что в пределах некоторого интервала времени в качестве модели группы мобильных объектов может быть принята статическая сеть, то это делает возможным оценивать структурную надежность на основе топологических характеристик сети [9–14].

Рассмотрим пример оценивания обобщенной характеристики структурной надежности на основе совокупности частных структурных характеристик.

Допустим, коммуникационной системе, соответствующей группе мобильных киберфизических систем, ставится в соответствие сеть (рис. 1). Узлы сопряжения с другими компонентами информационной решетки (узлы 6 и 3) выделены посредством жирных пунктирных двунаправленных стрелок. Узлы сети соответствуют киберфизическим компонентам группы.

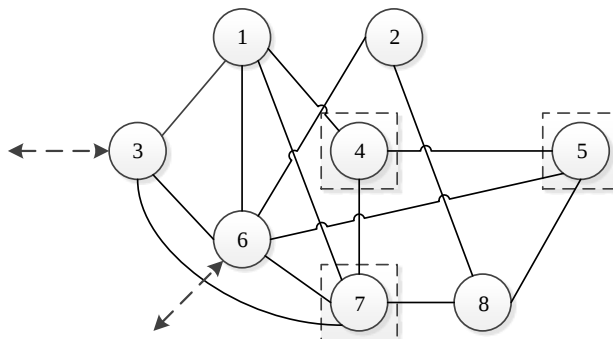


Рис. 1 Представление физической топологии в виде графа.

Продemonстрируем схему формирования относительных значений частных топологических характеристик, которые составят основу вычисления обобщенной характеристики структурной надежности.

а) *Степени узлов.* Основу вычислений составляет соотношение:

$$\sigma_c = \sum_{j=1}^N k_j, \quad (1)$$

где σ_c – характеристика сети,

$$\begin{cases} k_j = 0, & j - \text{точка сопряжения,} \\ k_j = p_j, & j - \text{степень } j\text{-го узла в противном случае.} \end{cases}$$

В случае полносвязного графа $\sigma_{nc} = N(N - 1)$.

Значение относительной характеристики определяется выражением $\sigma_{отн} = \frac{\sigma_c}{\sigma_{nc}}$.

Значения k_j представленного графа (с учетом того, что узлы 6 и 3 являются узлами сопряжения) представлены в табл. 1.

Таблица 1

Значения k_j графа						
Номер узла	1	2	4	5	7	8
Степень узла k_j	4	2	3	3	5	3

Учитывая, что в рассматриваемом примере $N = 8$, значение $\sigma_{отн}$ составит

$$\sigma_{отн} = \frac{4+2+3+3+5+3}{8 \times (8-1)} = \frac{20}{56} \approx 0.35. \quad (2)$$

б) *Запас структурной надежности* (ресурс по связям) [15]. Определяется посредством соотношения:

$$\alpha = \frac{R}{R_{\min}} - 1, \quad (3)$$

где R – число ребер в системе;

$$R_{\min} = N - 1,$$

где N – число узлов.

Для рассматриваемого примера $R = 14$; $R_{\min} = 7$. Следовательно,

$$\alpha_c = \frac{14}{7} - 1 = 1.$$

Для полносвязного графа при $N = 8$ запас структурной надежности имеет значение $\alpha_c = 3$, так что $\alpha_{отн} = \frac{\alpha_c}{\alpha_{nc}} \approx 0.33$.

в) *Диаметр графа*. Определяется по правилу:

$$d = \max \{d_{i,j}\}, \quad (4)$$

где $d_{i,j}$ – самый короткий путь между висячей i -й и тупиковой j -й вершинами графа.

В рассматриваемом случае значения $d_{i,j}$ представлены на рис. 2.

$i-j$	4	5	7
4		1	1
5	1		2
7	1	2	

Рис. 2 Значения $d_{i,j}$.

Значение $d_c = 2$. Для полносвязного графа $d_{nc} = 1$. Таким образом, нормированное значение составит $d_{отн} = \frac{d_{nc}}{d_c} = 0.5$. Отличие схем вычисления $d_{отн}$ от $\sigma_{отн}$ обусловлено стремлением получить значения одного порядка сравнительных характеристик сети по отношению к эталонным.

г) В качестве характеристики значимости узлов в коммуникационной сети выступают их средние степени $p_k^{(+)}$ [16]. Основу вычислений составляет соотношение:

$$M = \sum_{k=\min\{p_k^{(+)}\}}^{\max\{p_k^{(+)}\}} \beta_{p_k^{(+)}}^{(k)} p_k^{(+)}, \quad (5)$$

где $p_k^{(+)}$ – степень k -го узла; $\beta_{p_k^{(+)}}^{(k)}$ – доли (весовые коэффициенты) узлов со степенью k .

Для рассматриваемого примера составляют соответственно:

$$p_1^{(+)} = \frac{4}{14}; p_2^{(+)} = \frac{2}{14}; p_3^{(+)} = \frac{3}{14}; p_4^{(+)} = \frac{3}{14}; p_5^{(+)} = \frac{3}{14}; p_6^{(+)} = \frac{5}{14}; p_7^{(+)} = \frac{5}{14}, p_8^{(+)} = \frac{3}{14}.$$

Правила вычисления средней степени определены в [17]. По значениям средних степеней можно заключить, что наиболее значимыми будут узлы 6 и 7. Для рассматриваемого графа количество узлов, имеющих l -ю степень, представлено в табл. 2.

Таблица 2

Количество узлов графа, имеющих l -ю степень

Степень узла ($p_k^{(+)}$)	2	3	4	5
Количество узлов	1	4	1	2

Доли (весовые коэффициенты) узлов со степенью $l = 2; 3; 4; 5$ составляют:

$$\beta_{p_k^{(+)}}^{2} = 0.125; \beta_{p_k^{(+)}}^{3} = 0.5; \beta_{p_k^{(+)}}^{4} = 0.125; \beta_{p_k^{(+)}}^{5} = 0.25.$$

Агрегированная характеристика средней степени узла составит:

$$M_c = \sum_{k=2}^5 \beta_{p_k^{(+)}}^{(k)} p_k^{(+)} = 0.125 \times 2 + 0.5 \times 3 + 0.125 \times 4 + 0.25 \times 5 = 3.75.$$

Для полносвязного графа с тем же числом узлов $N = 8$ среднее значение степени узла составит $\beta_{p_k^{(+)}}^{7} = \frac{1}{8}$, $k = \overline{1,8}$, а линейная свертка $M_{nc} = 7$.

Относительное значение агрегированной характеристики составляет:

$$M_{отн} = \frac{M_c}{M_{nc}} = 0.53.$$

Используя нормированные значения учитываемых показателей, вычислим средний статистический индекс по правилу [2]:

$$I = \frac{w_1 \sigma_{отн} + w_2 \alpha + w_3 d_{отн} + w_4 M_{отн}}{\sum_{q=1}^4 w_q}.$$

В рассматриваемом демонстрационном примере выбрано лишь одно из возможных правил линейной свертки. В [2] для вычислений обобщенных параметров представлено множество сверток, в том числе нелинейных. Выбор метрики является отдельной задачей исследования.

Принимая значения весов учитываемых структурных характеристик $w_q, q = \overline{1,4}$ равными, получаем $I = 0.38$. Для сравнения отметим, что идеальному случаю соответствует значение $I = 1$. Таким образом, по совокупности признаков структурные свойства надежности системы составляют 42 % от идеальных.

Для сравнения в табл. 3 представлены значения среднего статистического индекса степени совпадения характеристик, вычисленного по тем же показателям для базовых топологических структур, а также ранг исследуемой системы в ряду базовых топологических структур (линейка, звезда, кольцо, полносвязная сеть [8]).

Таблица 3

Значения среднего статистического индекса степени совпадения характеристик

	Степень узла σ	Запас структурной надежности α	Диаметр графа d	Относительное значение агрегированной характеристики $M_{отн}$	Обобщенный параметр I	Ранг
Сеть	1	1	1	1	1	1
Кольцо	0.11	0.33	0.125	0.28	0.21	3
Звезда	0.29	0	0.5	0.14	0.21	3
Линейка	0.04	0	0.14	0.14	0.08	4
Исследуемая система	0.35	0.33	0.5	0.53	0.42	2

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНОЙ НАДЕЖНОСТИ
НА ОСНОВЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО-ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ**

В [3, 6, 7] указывается, что устойчивость функционирования сети, критически важным фактором которой является функциональная надежность, определяется её возможностью адаптироваться к изменению условий функционирования, обусловленных воздействиями дестабилизирующих факторов, в том числе способностью системы управления своевременно регистрировать факты изменения физической топологии и выбирать рациональную схему оперативного реагирования на изменения, в том числе за счет возможности формирования резервных путей передачи сигналов в рамках существующей физической топологии и технических характеристик линий связи; использование разных сред распространения сигнала.

При этом остается открытым вопрос о том, каков минимальный набор компонентов, при котором система сохраняет работоспособность. Построение параллельно-последовательных схем, основу построения которых составляет оценка последствий предполагаемого нарушения работоспособности компонентов системы, позволяет ответить на этот вопрос.

Для задач информационной поддержки сетецентрического управления значимые свойства коммуникационной структуры динамически определяются ситуациями, в которых оказываются объекты управления. В силу этого одной и той же физической системе, в зависимости от содержания понятия «значимые свойства», может быть поставлено в соответствие множество моделей. В работе [18] со ссылкой на Руководство по применению ISO/IEC 15288 отмечается, что под функциональной надежностью понимается готовность системы к выполнению предусмотренных задач. Особенностью сетецентрического управления является динамическое изменение состояния как объекта управления, так и среды его функционирования.

В [3, 8] в качестве характеристики безотказного функционирования системы определяется связность сети. В [19–20] связность определяется как основной показатель структурной живучести коммуникационной системы. Следует заметить, что помимо неоднозначности толкования понятия «предусмотренные задачи» имеет место множественность толкований понятия «связность», что приводит к различным моделям для оценки надежности одной и той же системы. Например, в [3] связность определяется как вероятность того, что на заданном направлении существует хотя бы один путь, по которому возможна передача информации с требуемыми качеством и объемом. Однако в том же документе определяется понятие «основное направление связи»: совокупность линий передачи и узлов связи, обеспечивающая связь между двумя пунктами сети (для обеспечения деятельности органов государственного управления, обороны, безопасности, охраны правопорядка, мобилизационной готовности при чрезвычайных ситуациях). Акцентируется внимание на необходимость учета характеристик надежности транзитных узлов, входящих в состав путей передачи сообщений. Это обосновы-

вадет необходимость включения в состав параллельно-последовательных схем, кроме компонент, соответствующих среде передачи сигнала, аппаратно-программные компоненты, реализующие протокол передачи.

Еще одной особенностью задач сетевых систем управления является возможность выделения классов объектов, функционирующих в условиях активного воздействия детализирующих факторов. Информационные системы, соответствующие таким объектам, можно рассматривать как невосстанавливаемые, и использовать для анализа надежности аппарат последовательно-параллельных схем.

Рассмотрим варианты последовательных-параллельных схем, соответствующие физической топологии (рис. 3), но при разном содержании связности.

Допустим, системе ставится в соответствие физическая топология (рис. 3). Подобная модель, например, может быть поставлена в соответствие двум сетям, устойчивым к разрывам (Delay/Disruption Tolerant Networking), находящимся в разных областях, и которым ставятся в соответствие различные региональные идентификаторы (Region ID) [21].

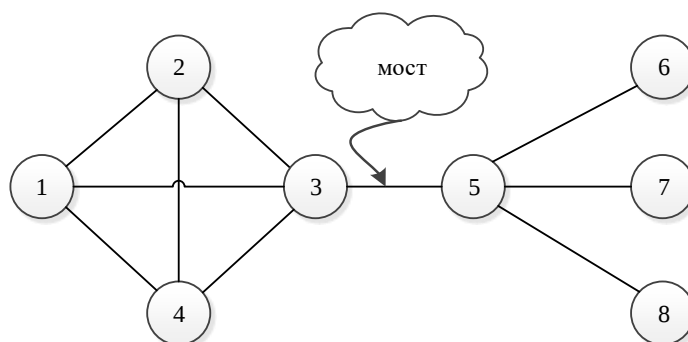


Рис. 3 Пример физической топологии.

1) Рассмотрим случай, когда под связностью понимается возможность передачи сообщений между двумя любыми узлами системы.

В этом случае отказом считается невозможность взаимодействия с любым из узлов, что будет иметь место в следующих случаях:

- отсутствуют каналы связи между узлами 1; 3; 2; 4;
- отсутствует канал связи между узлами 3 и 5 (разрушен мост);
- отсутствуют каналы связи между узлом 5 и каким-либо из узлов 6; 7; 8.

В состав канала, помимо компонент, формирующих среду передачи, входят аппаратно-программные компоненты, обеспечивающие передачу в соответствии с выбранным протоколом. В этом случае схеме, представленной на рис. 3, может быть поставлена в соответствие параллельно-последовательная логическая схема, представленная на рис. 4.

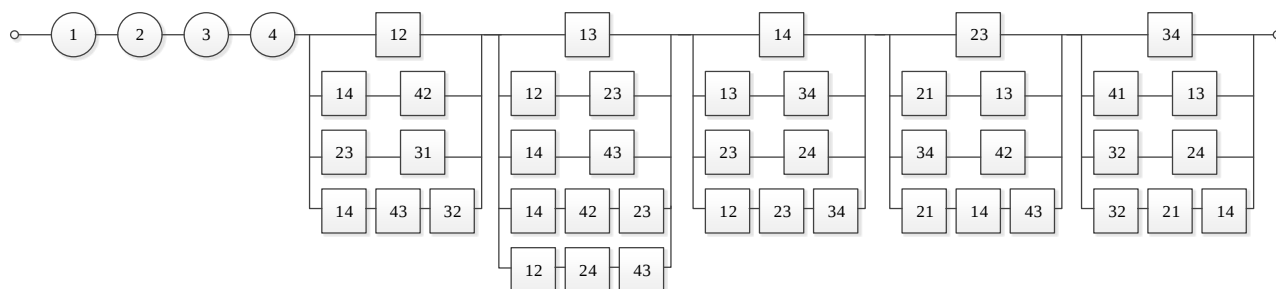


Рис. 4 Структурная схема, соответствующая пиринговой системе.

2) Рассмотрим теперь случай, когда отказом системы считается отсутствие связи между различными по значимости узлами.

Примером таких систем являются мобильные системы, в которых отсутствует непосредственная связь между узлом-источником и узлом назначения, но передать поэтапно сообщение можно за счет того, что известны характеристические профили (Characteristic Profile) хостов [11], в основе чего лежит функциональная зависимость местоположения хоста от времени, а также «традиционные» (англ. – conventional) MANET [12].

Пусть критически важным в базовой топологической структуре «сеть» является наличие связи между узлами 1 и 3, а в базовой топологической структуре «звезда» – между узлами 5 и 7. Относительно других узлов считается, что учет их состояние (работоспособное/неработоспособное) значения не имеет.

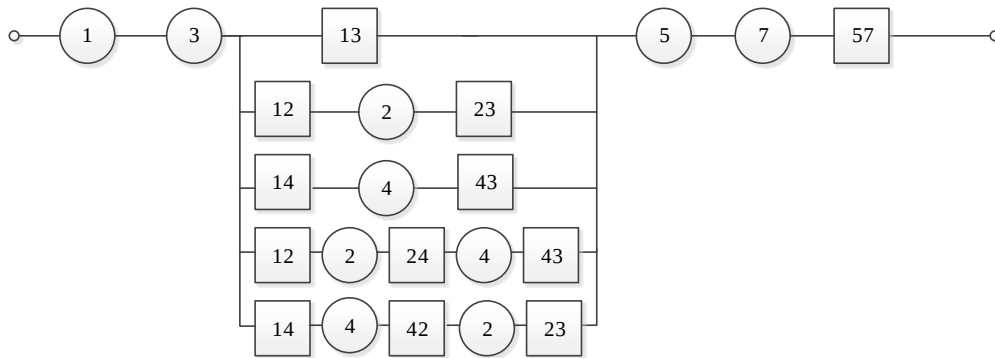


Рис. 5 Схема, соответствующая разной значимости передачи сообщений между узлами.

В этом случае в базовой топологической структуре «сеть» должна иметься связь либо с узлом 3, либо с узлом 4; в базовой топологической структуре «звезда» – связь между узлом 6 либо узлом 8. Этому случаю соответствует схема, представленная на рис. 5.

3) Рассмотрим случай, когда система считается работоспособной, если есть связь хотя бы между любой парой узлов. Ему соответствует схема, представленная на рис. 6.

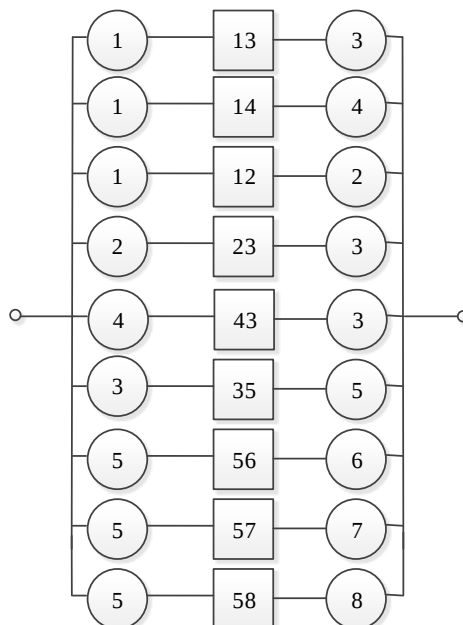


Рис. 6 Схема, соответствующая случаю, когда имеется связь между любыми двумя узлами.

Таким образом, аппарат последовательно-параллельных схем позволяет получить сопоставимые оценки надежности транспортных компонент при различных требованиях к их функциональным возможностям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассматриваемый подход, основанный на анализе совокупности структурных характеристик, значимых с точки зрения надежности, позволяет свести задачу формирования обобщенной оценки структурной надежности к использованию аппарата статистических индексов, где в качестве базовых констант выступают топологические характеристики полносвязной сети. Выбор полносвязной сети в качестве базовой обусловлен тем, что эта топологическая структура обладает наилучшими, с точки зрения структурной надежности, свойствами. Особенности подхода являются возможности наращивания числа учитываемых структурных параметров, а также полная формализация процедуры оценивания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- [1] Белоглазов Д. А., Гайдук А. Р., Косенко Е. Ю. и др. Групповое управление подвижными объектами в неопределенных средах / Под ред. В.Х. Пшихопова. М.: Физматлит, 2015. 307 с. EDN [XYICFV](#). [[Beloglazov D. A., Gaiduk A. R., Kosenko E. Yu. Group Control of Moving Objects in Uncertain Environments. Moscow: Physmatlite, 2015. EDN [XYICFV](#). (In Russian).]]
- [2] Гаскаров Д. В., Мозгалеvский А. В., Голинкевич Т. А. Прогнозирование технического состояния и надежности радиоэлектронной аппаратуры. М.: Сов. Радио, 1974. 224 с. [[Gaskarov D. V., Mozgalevsky A. V., Golinkevich T. A. Forecasting the Technical Condition and Reliability of Electronic Equipment. Moscow: Sov. Radio, 1974. (In Russian).]]
- [3] ГОСТ Р 53111-2008 «Национальный стандарт Российской Федерации Устойчивость функционирования сети связи общего пользования. Требования и методы проверки». М.: Стандартинформ, 2008. [[GOST R 53111-2008 "National standard of the Russian Federation Stability of operation of the public communication network. Requirements and testing methods". Moscow, 2008. (In Russian).]]
- [4] ГОСТ 24.701-86 «Надежность автоматизированных систем управления. Основные положения». М.: Стандартинформ, 2009. [[GOST 24.701-86 "Reliability of automated control systems. Basic provisions". Moscow, 2009. (In Russian).]]
- [5] Faezeh P., Paulo J., Kunst R., Islam N., Hardjawana W., Pignaton E. A review of flying ad hoc networks: key characteristics, applications, and wireless technologies // Remote Sens. 2022. 14. 4459. URL: <https://doi.org/10.3390/rs14184459>. EDN [WKNHRG](#).
- [6] Valdez L., Shekhtman L., La Rocca C., Zhang X., Buldyrev S., Trunfio P., Review S. Cascading failures in complex networks // Journal of Complex Networks. 2020. 2. Advance Access Publication on 31 May 2020. doi: 10.1093/comnet/cnaa013
- [7] Савантеев В. В., Пылинский М. В., Захарченко А. С., Кривцов С. П., Плут М. Н., Сарафанников В. С. Принципы формирования иерархической системы показателей эффективности процесса функционирования сети связи специального назначения // Информатика и вычислительная техника и управление. Серия: Естественные и технические науки, 2020. С. 124–130. EDN [JIPEGH](#). [[Savanteev V. V., Pylinsky M. V., Zakharchenko A. S., Krivtsov S. P., Plut M. N., Sarafannikov V. S., "Principles of formation of a hierarchical system of performance indicators for the functioning of a special-purpose communication network" // Computer Science and Computer Engineering and Management, Series: Natural and Technical Sciences, No. 4, pp. 124–130, 2020. (In Russian). URL: <https://doi.org/10.37882/2223-2966.2020.04.35>. EDN [JIPEGH](#).]]
- [8] Тимофеев А. В. Адаптивное управление и интеллектуальный анализ информационных потоков в компьютерных сетях. СПб.: Анатолия, 2012. 280 с. [[Timofeev A. V. Adaptive Control and Intelligent Analysis of Information Flows in Computer Networks. SPb.: "Anatolia", 2012. (In Russian).]]
- [9] Гвоздев В. Е., Гузаиров М. Б., Давлиева А. С., Галимов Р. Р. Оценка характеристик информационной безопасности радиосети MANET на основе анализа топологий связей // Научный журнал «Доклады ТУСУР». 2023. Вып. 4. Т. 26. С. 35–43. EDN [ZORJPH](#). [[Gvozdev V. E., Guzairov M. B., Davlieva A. S., Galimov R. R. "Evaluation of the characteristics of information security of the MANET radio network based on the analysis of connection topologies" // Proceedings of TUSUR University. 2023. Vol. 26. No. 4, pp. 35-43. EDN [ZORJPH](#). (In Russian).]]
- [10] Gvozdev V. E., Davlieva A. S., Galimov R. R. Reliability analysis of systems with dynamic structure based on the properties of nodes and channels // Advances in Science, Technology and Engineering Systems, RusAutoCon. 2023. Pp. 425–430.
- [11] Gvozdev V. E., Davlieva A. S., Galimov R. R. Rapid assessment of MANET reliability trends // Proceedings - 2023 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM. 2023. Pp. 554–559.
- [12] Гвоздев В. Е., Давлиева А. С. Оценка функциональной безопасности аппаратно-программных комплексов на основе математико-статистических методов // СИИТ. 2023. Т. 5. № 2(11). С. 33–40. EDN [VLLUZS](#). [[Gvozdev V. E., Davlieva A. S. "Assessment of the functional safety of hardware and software complexes based on mathematical and statistical methods" // SIIT. 2023. Vol. 5, no. 2(11), pp. 33–40. EDN [VLLUZS](#). (In Russian).]]
- [13] Семенова В. А., Смирнов С. В. Механизм нормализации эмпирического контекста в онтологическом анализе данных // СИИТ. 2021. Т. 3. № 3(7). С. 45–52. EDN [QXRTXB](#). [[Semenova V. A., Smirnov S. V. "Mechanism of normalization of empirical context in ontological data analysis" // SIIT. 2021. Vol. 3, no. 3(7), pp. 45–52. EDN [QXRTXB](#). (In Russian).]]

- [14] Маслов С. Г., Бельтюков А. П. Проблемы разработки физико-антропо-технических систем // СИИТ. 2021. Т. 3. № 2(6). С. 44–49. EDN [OIBZDG](#). [[Maslov S. G., Beltyukov A. P. "Problems of development of physical-anthropo-technical systems" // SIIT. 2021. Vol. 3, no. 2(6), pp. 44–49. EDN [OIBZDG](#). (In Russian).]]
- [15] Николаев В. И., Брук В. М. Системотехника: методы и приложения. Л.: Машиностроение, 1985. 199 с. [[Nikolaev V. I., Brook V. M. Systems Engineering: Methods and Applications. Leningrad: Mechanical Engineering, 1985. (In Russian).]]
- [16] Михайлов Р. Л., Макаренко С. И. Оценка устойчивости сети связи в условиях воздействия на неё дестабилизирующих факторов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2013. № 4. С. 69–78. EDN [RPKKRP](#). [[Mikhailov R. L., Makarenko S. I. "Assessment of the stability of a communication network under the influence of destabilizing factors" // Radio-technical and Telecommunication Systems. 2013, No. 4, pp. 69–78. EDN [RPKKRP](#). (In Russian).]]
- [17] Харари Ф. Теория графов. М.: Мир, 1973. 300 с. [[Harari F. Graph Theory. Moscow: Mir, 1973. (In Russian).]]
- [18] Шубинский И. Б. Функциональная надежность информационных систем. Методы анализа. М.: Журнал «Надежность», 2012. 296 с. EDN [QMXPUD](#). [[Shubinsky I. B. Functional Reliability of Information Systems. Analysis Methods. Moscow: "Reliability Magazine", 2012. EDN [QMXPUD](#). (In Russian).]]
- [19] Князева Н. А., Грищенко И. В., Шестопалов С. В. Метод обеспечения живучести телекоммуникационной сети на основе перераспределения ресурсов сети // Холодильная техника и технологии. 2014. № 4 (150). С. 65–70. EDN [XINSJD](#). [[Knyazeva N. A., Grishchenko I. V., Shestopalov S. V. "Method of ensuring the survivability of a telecommunication network based on the redistribution of network resources" // Refrigeration Engineering and Technology. 2014. No. 4 (150), pp. 65–70. EDN [XINSJD](#). (In Russian).]]
- [20] Гайдук А. Р., Каляев И. А., Капустян С. Г., Кухаренко А. П. Модели и методы управления большими группами роботов: Уч. пос. Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2014. 106 с. EDN [DKRLNU](#). [[Gaiduk A. R., Kalyaev I. A., Kapustyan S. G., Kukharensko A. P. Models and Methods for Controlling Large Groups of Robots: a tutorial. Rostov-on-Don: Southern Federal University, 2014. EDN [DKRLNU](#). (In Russian).]]
- [21] Voyiatzis A. G. "A Survey of delay- and disruption-tolerant networking applications" // Journal of Internet Engineering. 2012. Vol. 5. No. 1. Pp. 331–344.

Поступила в редакцию 12 декабря 2024 г.

МЕТАДААННЫЕ / METADATA

Title: Generalized characteristics of structural network reliability.

Abstract: Functional reliability of communication systems is a critical factor in the efficiency of solving network-centric management problems. One of the tasks of organizing information exchange in a mobile system of cyber-physical devices is a comparative analysis of alternative options for implementing the topology of information communications between devices using a set of indicators, including structural reliability. The conceptual basis of the proposed approach is to reduce the problem of constructing generalized indicators of structural reliability based on topological characteristics to the use of statistical indexes, in which the values of indicators corresponding to a fully connected network are used as basic constants.

Key words: structural reliability; network-centric management; groups of cyber-physical devices; topology of information communications; generalized characteristics, statistical indices.

Язык статьи / Language: Русский / Russian.

Об авторах / About the authors:

ГВОЗДЕВ Владимир Ефимович

Уфимский университет науки и технологий, Россия.

Проф. каф. технической кибернетики. Дипл. инж. электрон-ной техники (Уфимск. авиац. ин-т, 1978). Д-р техн. наук по упр. в техн. системах (Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т, 2000), профес-сор. Иссл. в обл. мат. статистики, информ. систем, экологич. мониторинга.

E-mail: wega55@mail.ru

ORCID: 0009-0004-8557-3445

GVOZDEV Vladimir Efimovich

Ufa University of Science and Technology, Russia.

Prof., Dept. of Technical Cybernetics. Dipl. of electronic engineer (Ufa Aviat. Institute, 1978). Dr. of Tech. Sci. in technical systems control (Ufa State Aviat. Technical University, 2000). Research in mathematical statistics, information systems, environmental monitoring.

E-mail: wega55@mail.ru

ORCID: 0009-0004-8557-3445

ГУЗАЙРОВ Мурат Бакеевич

Уфимский университет науки и технологий, Россия.

Проф. каф. управления информационной безопасностью, профессор. Дипл. инж.-радиомеханик (Уфимск. авиац. ин-т, 1973). Д-р техн. наук по упр. в техн. системах (Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т, 1998). Иссл. в обл. управления в социальных и экономических системах.

E-mail: GuzairovMB@uust.ru

GUZAIROV Murat Bakeevich

Ufa University of Science and Technology, Russia.

Prof., Dept. of Information Security Management, professor. Dipl. of radio mechanic engineer (Ufa Aviation Institute, 1973). Dr. of Tech. Sci. in technical systems control (Ufa State Aviation Technical Univer-sity, 1998). Research in management in social and economic systems..

E-mail: GuzairovMB@uust.ru

РАКИПОВА Алия Салаватовна

Уфимский университет науки и технологий, Россия.

Доц. каф. технической кибернетики. Дипл. препод.-исследователь (Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т, 2019). Канд. техн. наук (Там же, 2022). Иссл. в обл. математической статистики, информационных систем.

E-mail: RakipovaAS@uust.ru

ORCID: 0000-0002-7548-2134

ГАЛИМОВ Роберт Ришатович

Уфимский университет науки и технологий, Россия.

Соискатель ученой степени кандидата наук. Дипл. препод.-исследователь (Уфимск. ун-т науки и технологий, 2024). Иссл. в обл. математической статистики, информационных систем.

E-mail: rrgalimov@gmail.com

ORCID: 0009-0006-5947-7067

RAKIPOVA Aliya Salavatovna

Ufa University of Science and Technology, Russia.

Associate Prof., Dept. of Technical Cybernetics. Dipl. of lecturer and researcher (Ufa State Aviation Technical University, 2019). Cand. Tech. Science (Ufa State Aviation Technical University, 2022). Research in mathematical statistics, information systems..

E-mail: RakipovaAS@uust.ru

ORCID: 0000-0002-7548-2134

GALIMOV Robert Rishatovich

Ufa University of Science and Technology, Russia.

Candidate of Sciences degree applicant. Dipl. of lecturer and researcher (Ufa University of Science and Technology, 2024). Research in mathematical statistics, information systems.

E-mail: rrgalimov@gmail.com

ORCID: 0009-0006-5947-7067