ВЕСТНИК ТОМСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
2022 Управление, вычислительная техника и информатика № 59
Tomsk State University Journal of Control and Computer Science

ИНФОРМАТИКА И ПРОГРАММИРОВАНИЕ

INFORMATICS AND PROGRAMMING

Научная статья
УДК 519.718:004.722
doi: 10.17223/19988605/59/10

Анализ вероятности связности телекоммуникационной сети на основе инверсий ее состояний

Александр Александрович Батенков[1], Кирилл Александрович Батенков[2], Александр Борисович Фокин[3]

[1] *Орловский государственный университет, Орел, Россия*
[2, 3] *Академия Федеральной службы охраны, Орел, Россия*
[1] *batenkov1957@mail.ru*
[2] *pustur@yandex.ru*
[3] *tatarin57ru@mail.ru*

Аннотация. Представлен вариант устранения основного недостатка наиболее совершенных модификаций метода, использующих многопеременную инверсию. Он предполагает рассмотрение не объединения событий связности (несвязности), вырождающегося в сумму несовместных произведений, а пересечения противоположных событий. Подобная сумма не требует использования многопеременной инверсии для каждого из слагаемых. В итоге данные преобразования позволяют анализировать вероятность связности произвольного графа с несколько меньшей вычислительной сложностью по сравнению с классическими методами многопеременной инверсии.

Ключевые слова: сеть связи; граф; вероятность связности; многопеременная инверсия

***Для цитирования*:** Батенков А.А., Батенков К.А., Фокин А.Б. Анализ вероятности связности телекоммуникационной сети на основе инверсий ее состояний // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2022. № 59. С. 91–98. doi: 10.17223/19988605/59/10

Original article
doi: 10.17223/19988605/59/10

Network connectivity probability analysis based on its states inversion

Aleksandr A. Batenkov[1], Kirill A. Batenkov[2], Aleksandr B. Fokin[3]

[1] *Orel State University, Orel, Russian Federation*
[2, 3] *Academy of Federal Guard Service, Orel, Russian Federation*
[1] *batenkov1957@mail.ru*
[2] *pustur@yandex.ru*
[3] *tatarin57ru@mail.ru*

Abstract. The paper shows that since for large and complex telecommunications networks the calculation of the connectivity probability turns out to be a very cumbersome and time-consuming process due to the huge number of elements in the resulting expression, the most appropriate way out of this situation is an approach based on the representation of the network connectivity event in the form of sums of products of incompatible events, which represent a form of transition to substitution, allowing a direct transition to a probability function by replacing logical variables (sets) with probabilities, and logical operations (operations on sets) by corresponding arithmetic operations. This rep-

© А.А. Батенков, К.А. Батенков, А.Б. Фокин, 2022

resentation leads to a fairly compact form of writing the resulting connectivity equation and, as a result, to a decrease in computational complexity and a decrease in the resulting rounding error. It is indicated that this approach is recommended by the domestic GOST for calculating the stability of the functioning of networks and in the scientific literature has been called the method of combining taking into account the absorption effect.

It is explained that there are several interpretations of the concept of connectivity, a generalization of which is multi-pole connectivity, including both two-pole and all-pole. In this case, it is advisable to consider the connectivity event as the existence of a certain subgraph in a specific implementation of the graph containing the given vertices, the original random graph and uniquely being a tree whose leaves can only be these specified vertices. For the general case of a multi-pole network, these subgraphs are trees that have a given set of vertices, for a two-pole network – trees containing a given pair of vertices, in fact, they are paths, for an all-pole network-spanning trees that include all the vertices of a random graph.

The paper presents a variant of eliminating the main drawback of the most advanced modifications of the method using multi-variable inversion – the need for a comparative analysis of each term with all previously considered for the uniqueness of the contained edges, as well as in some cases additional operations on sets. According to this variant, it is advisable to consider not the union of connectivity events (incoherence), which degenerates into the sum of incompatible events, but the intersection of opposite events, which also leads to a similar sum, but to obtain which there is no need to perform a multi-variable inversion for each of the terms over all previously analyzed ones.

The procedures for bringing two incoherent events to the union of independent events, as well as three incoherent events to the union of independent events, which will allow us to obtain a recurrent method for calculating the probability of connectivity in the future, are described.

Keywords: communication network; graph; connectivity probability; multi-variable inversion

***For citation*:** Batenkov, A.A., Batenkov, K.A., Fokin, A.B. (2022) Network connectivity probability analysis based on its states inversion. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitelnaja tehnika i informatika – Tomsk State University Journal of Control and Computer Science*. 59. pp. 91–98. doi: 10.17223/19988605/59/10

Известно, что для больших и сложных по структуре телекоммуникационных сетей расчет вероятности связности оказывается весьма громоздким и трудоемким процессом вследствие огромного числа элементов в результирующем выражении. Наиболее целесообразным выходом из подобной ситуации является подход, основанный на представлении события связности сети в виде сумм произведений несовместных событий (SDP – Sum of Disjoint Product) [11], представляющих собой форму перехода к замещению [2–6], допускающую непосредственный переход к вероятностной функции заменой логических переменных (множеств) вероятностями, а логических операций (операций над множествами) соответствующими арифметическими операциями [7–9]. Данное представление приводит к достаточно компактной форме записи результирующего уравнения связности и, как следствие, к снижению вычислительной сложности и уменьшению результирующей ошибки округления [10, 11]. Отметим, то данный подход рекомендован отечественным ГОСТом для расчета устойчивости функционирования сетей [12] и в научной литературе получил название метода объединения с учетом эффекта поглощения [13].

Само представление события связности сети в виде сумм произведений несовместных событий [11] базируется на методе многопеременных инверсий, являющемся расширением алгоритма однопеременной инверсии (SVI – Single Variable Inversion). На основе наборов типовых подграфов (простая цепь, остовое дерево) данный алгоритм рекурсивно генерирует непересекающиеся подмножества для каждого из наборов. Алгоритм построен по принципу цикл в цикле. Во внутреннем цикле произведения инвертируются целиком, а не последовательно по каждой из переменных в отдельности. В результате формируется значительно меньше составляющих относительно SVI вследствие рассмотрения большего количества переменных за один такт. Внешний цикл перебирает последовательно все отдельные типовые подграфы и рекурсивно перебирает инверсии с ранее выполненными преобразованиями.

В подобном алгоритме требуется на каждом шаге внешнего цикла проводить сравнение текущего выражения связности типового подграфа с ранее полученными соотношениями, причем необходимо проанализировать обязательно их все. В настоящей работе предлагается снизить сложность данной рутинной процедуры за счет рассмотрения не события связности исходного графа, а события несвязности. В результате каждый шаг внешнего цикла в ряде случаев будет анализировать меньшее количество слагаемых в ранее полученном выражении, что сократит вычислительную сложность расчета вероятности связности.

1. Общий подход к расчету вероятности связности на основе инверсий состояний сети

Известно несколько трактовок понятия связности, обобщением которого является многополюсная связность, включающая и двухполюсную, и всеполюсную. При этом целесообразно рассматривать событие связности как существование некоторого подграфа S_i в конкретной реализации графа G, содержащего заданные вершины, исходного случайного графа G и однозначно являющегося деревом, листьями которого могут быть только эти заданные вершины [14]. Для общего случая многополюсной сети этими подграфами S_i оказываются деревья, имеющие заданный набор вершин, для двухполюсной сети – деревья, содержащие заданную пару вершин, по сути, являющиеся путями, для всеполюсной сети – остовые деревья, включающие все вершины случайного графа G [15].

Таким образом, множество S графов, для которого выполняется свойство связности, имеет следующий вид:

$$S = \{G : \exists S_i \subseteq G\}, \tag{1}$$

т.е. множество S состоит из всех графов G, для которых существует хотя бы один подграф S_i, содержащийся в графе G [16].

Следует отметить, что даже наиболее совершенным модификациям метода, использующим многопеременную инверсию (MVI – Multiple Variable Inversion), свойствен существенный недостаток, связанный с необходимостью сравнительного анализа каждого слагаемого со всеми ранее рассмотренными на предмет уникальности содержащихся ребер, а также выполнения в ряде случаев дополнительных операций над множествами [1, 17, 18]. Для устранения подобных повторяющихся рутинных процедур целесообразно рассматривать не объединение событий связности (несвязности), вырождающееся в сумму несовместных произведений, а пересечение противоположных событий, также приводящее к подобной сумме, но для получения которой нет необходимости выполнять многопеременную инверсию для каждого из слагаемых над всеми ранее проанализированными.

Так, согласно формуле (1) событие S связности графа G следует трактовать как объединение событий связности всех его подграфов, что приводит к справедливости следующего выражения для события S связности сети:

$$S = \bigcup_{i=1}^{s} S_i,$$

где S_i, $i = 1,\ldots,s$, – событие связности i-го типового подграфа (пути, остового, а в общем случае многополюсного дерева) случайного графа G.

Каждое событие S_i связности типового подграфа является сложным и происходит только при условии связности (работоспособности) содержащихся в этом подграфе ребер, т.е.

$$S_i = \bigcap_{l_j \in S_i} l_j,$$

где l_j, $j = 1,\ldots,l$, – событие связности (работоспособности) j-го ребра графа G.

По условию формулировки обобщенной модели Эрдеша–Реньи все данные события независимы, следовательно, вероятность связности подграфа [19, 20]

$$P(S_i) = \prod_{l_j \in S_i} P(l_j).$$

Отметим, что для события S связности графа G данная мультипликативная формула в общем случае несправедлива, поскольку события S_i связности типовых подграфов могут быть зависимы вследствие присутствия одинаковых ребер в данных подграфах. Именно в этом и заключается основная проблема расчета вероятности связности, так как отдельные подграфы оказываются взаимозависимыми, а получаемые выражения не являются формами перехода к замещению.

Хорошо известный принцип двойственности [22] позволяет записать событие $\overline{S}$ несвязности графа G как пересечение событий $\overline{S_i}$ несвязности типовых подграфов

$$\overline{S} = \bigcap_{i=1}^{s} \overline{S_i}.$$

В результате на основе формулы полной вероятности вероятность $P(S)$ связности графа выражается на основе вероятностей событий несвязности:

$$P(S)=1-P(\bar{S})=1-P\left(\bigcap_{i=1}^{s}\overline{S_i}\right).$$

Главным достоинством данного выражения является то, что дальнейший переход к вероятностной форме не потребует рассмотрения во всех суммах инверсии всех ранее учтенных подграфов [16, 21].

Достаточно просто на основе принципа двойственности формализуется выражение для события $\bar{S}$ несвязности графа на основе событий l_j работоспособности ребер:

$$\overline{S_i}=\overline{\bigcap_{l_j\in S_i} l_j}=\bigcup_{l_j\in S_i}\overline{l_j}.$$

2. Процедура приведения двух событий несвязности к объединению независимых событий

Для наглядности дальнейших упрощений целесообразно первоначально рассмотреть процедуру упрощения для двух произвольных подграфов. Пересечение событий связности этих двух подграфов (рис. 11)

$$S_iS_k=\bigcap_{l_j\in S_i} l_j\bigcap_{l_j\in S_k} l_j=\bigcap_{\substack{l_j\in S_i\\ l_j\in S_k}} l_j\bigcap_{\substack{l_j\in S_i\\ l_j\notin S_k}} l_j\bigcap_{\substack{l_j\notin S_i\\ l_j\in S_k}} l_j=a_{i,k}a_{i/k}a_{k/i},$$

где $a_{i,k}=\bigcap_{\substack{l_j\in S_i\\ l_j\in S_k}} l_j$ – событие связности ребер, входящих одновременно в *i*-й и *k*-й подграфы; $a_{i/k}=\bigcap_{\substack{l_j\in S_i\\ l_j\notin S_k}} l_j$ – событие связности ребер, входящих в *i*-й и не входящих в *k*-й подграфы; $a_{k/i}=\bigcap_{\substack{l_j\notin S_i\\ l_j\in S_k}} l_j$ – событие связности ребер, входящих в *k*-й и не входящих в *i*-й подграфы.

Отметим, что с целью устранения громоздкости используемых обозначений операция $\bigcap$ пересечения событий пропускается, если не возникает неоднозначности толкований [11, 22].

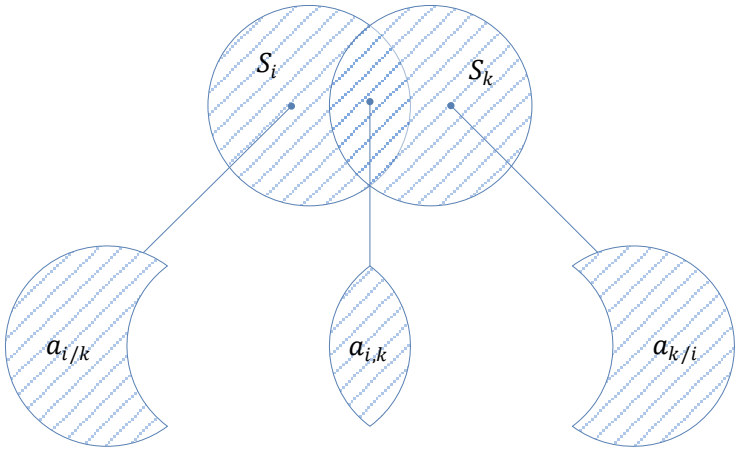

Рис. 1. Разбиение двух событий связности подграфов на независимые
Fig. 1. Splitting of two subgraph connectivity events into independent

Поскольку все полученные события независимы, то

$$P(S_iS_k)=P(a_{i,k})P(a_{i/k})P(a_{k/i}).$$

В результате события связности

$$S_i=a_{i,k}a_{i/k},S_k=a_{i,k}a_{k/i}.$$

Тогда пересечение событий несвязности этих двух подграфов представимо в форме объединения двух независимых событий:

$$\overline{S_i}\,\overline{S_k} = \overline{a_{i,k}a_{i/k}}\;\overline{a_{i,k}a_{k/i}} = \overline{a_{i,k}} \cup \left(a_{i,k}\,\overline{a_{i/k}}\;\overline{a_{k/i}}\right).$$

Полученное выражение является, по сути, классической формой перехода к замещению, т.е.

$$P\left(\overline{S_i}\,\overline{S_k}\right) = P\left(\overline{a_{i,k}}\right) + P\left(a_{i,k}\right)P\left(\overline{a_{i/k}}\right)P\left(\overline{a_{k/i}}\right).$$

3. Процедура приведения трех событий несвязности к объединению независимых событий

Для трех произвольных подграфов пересечение событий несвязности представимо в форме объединения тоже двух, но зависимых событий:

$$\overline{S_i}\,\overline{S_k}\,\overline{S_j} = \overline{a_{i,k}}\,\overline{S_j} \cup \left(a_{i,k}\,\overline{a_{i/k}}\;\overline{a_{k/i}}\;\overline{S_j}\right).$$

События $a_{i,k}$ и S_j связности возможно зависать как пересечение двух событий (рис. 22):

$$a_{i,k} = a_{i,k,j}a_{i,k/j},$$

$$S_j = a_{i,k,j}a_{j/i,k},$$

где $a_{i,k,j}$ – событие связности ребер, входящих одновременно в *i*-й, *k*-й и *j*-й подграфы; $a_{i,k/j}$ – событие связности ребер, входящих в *i*-й и *k*-й и не входящих в *j*-й подграфы; $a_{j/i,k}$ – событие связности ребер, входящих в *j*-й и не входящих в *i*-й и *k*-й подграфы.

Тогда

$$\overline{a_{i,k}}\,\overline{S_j} = \overline{a_{i,k,j}a_{i,k/j}}\;\overline{a_{i,k,j}a_{j/i,k}} = \overline{a_{i,k,j}} \cup \left(a_{i,k,j}\,\overline{a_{i,k/j}}\;\overline{a_{j/i,k}}\right),$$

$$a_{i,k}\,\overline{S_j} = a_{i,k,j}a_{i,k/j}\,\overline{a_{i,k,j}a_{j/i,k}} = a_{i,k}\,\overline{a_{j/i,k}}.$$

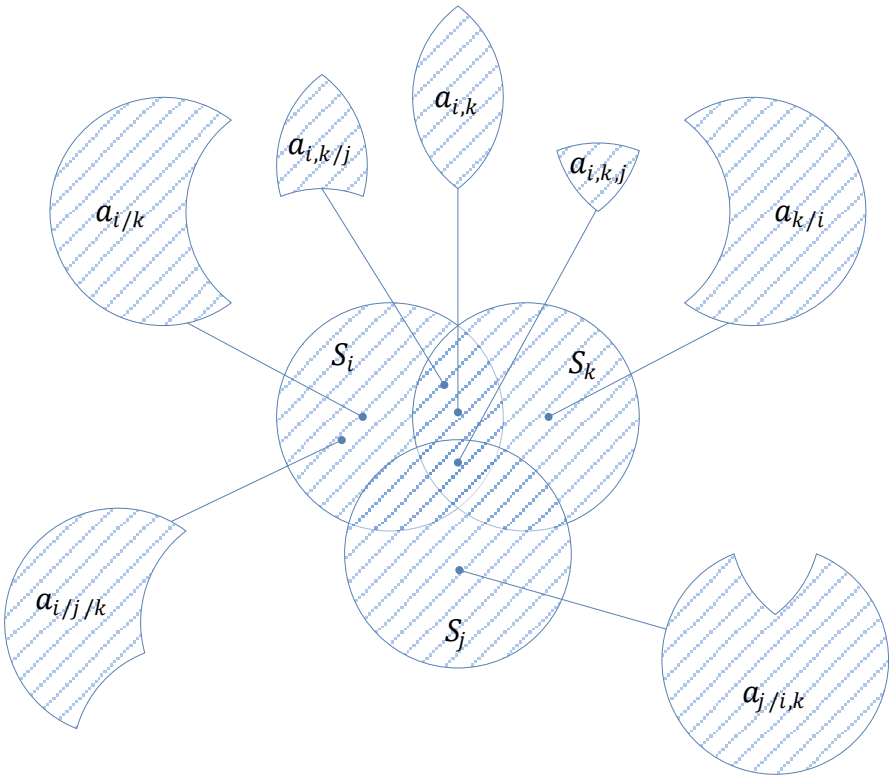

Рис. 2. Разбиение трех событий связности подграфов на независимые
Fig. 2. Splitting the three connectivity events of subgraphs into independent

В результате пересечение событий несвязности имеет вид двух независимых объединений и одного зависимого:

$$\overline{S_i}\,\overline{S_k}\,\overline{S_j} = \overline{a_{i,k,j}} \cup \left(a_{i,k,j}\,\overline{a_{i,k/j}}\,\overline{a_{j/i,k}}\right) \cup \left(a_{i,k}\,\overline{a_{j/i,k}}\,\overline{a_{i/k}}\,\overline{a_{k/i}}\right).$$

При этом в третьем объединении первые два события $a_{i,k}$ и $a_{j/i,k}$, а также события $a_{i,k}$, $a_{i/k}$ и $a_{k/i}$ являются независимыми, в то время как события $a_{j/i,k}$ и $a_{i/k}$, а также $a_{j/i,k}$ и $a_{k/i}$ – нет. Последующее упрощение аналогично ранее описанному и заключается в последовательной процедуре разложения пересечения обратных событий в виде объединений [14]. Поскольку

$$a_{j/i,k} = a_{i,j/k}a_{j/i},$$

$$a_{i/k} = a_{i,j/k}a_{i/j/k},$$

то

$$\overline{a_{j/i,k}}\,\overline{a_{i/k}} = \overline{a_{i,j/k}a_{j/i}}\,\overline{a_{i,j/k}a_{i/j/k}} = \overline{a_{i,j/k}} \cup \left(a_{i,j/k}\,\overline{a_{j/i}}\,\overline{a_{i/j/k}}\right),$$

$$\overline{S_i}\,\overline{S_k}\,\overline{S_j} = \overline{a_{i,k,j}} \cup \left(a_{i,k,j}\,\overline{a_{i,k/j}}\,\overline{a_{j/i,k}}\right) \cup \left(a_{i,k}\,\overline{a_{i,j/k}}\,\overline{a_{k/i}}\right) \cup \left(a_{i,k}\,a_{i,j/k}\,\overline{a_{j/i}}\,\overline{a_{i/j/k}}\,\overline{a_{k/i}}\right).$$

Оставшиеся зависимые события $a_{j/i}$ и $a_{k/i}$ раскладываются подобным образом:

$$a_{j/i} = a_{j,k/i}a_{j/i/k},$$

$$a_{k/i} = a_{j,k/i}a_{k/i/j},$$

$$\overline{a_{j/i}}\,\overline{a_{k/i}} = \overline{a_{j,k/i}a_{j/i/k}}\,\overline{a_{j,k/i}a_{k/i/j}} = \overline{a_{j,k/i}} \cup \left(a_{j,k/i}\,\overline{a_{j/i/k}}\,\overline{a_{k/i/j}}\right).$$

В результате образуется совокупность объединений независимых событий

$$\overline{S_i}\,\overline{S_k}\,\overline{S_j} = \overline{a_{i,k,j}} \cup \left(a_{i,k,j}\,\overline{a_{i,k/j}}\,\overline{a_{j/i,k}}\right) \cup \left(a_{i,k}\,\overline{a_{i,j/k}}\,\overline{a_{k/i}}\right) \cup \left(a_{i,k}\,a_{i,j/k}\,\overline{a_{i/j/k}}\,\overline{a_{j,k/i}}\right) \cup \left(a_{i,k}\,a_{i,j/k}\,a_{j,k/i}\,\overline{a_{i/j/k}}\,\overline{a_{j/i/k}}\,\overline{a_{k/i/j}}\right),$$

которая является формой перехода к замещению, т.е.

$$P\left(\overline{S_i}\,\overline{S_k}\,\overline{S_j}\right) = P\left(\overline{a_{i,k,j}}\right) + P\left(a_{i,k,j}\right)P\left(\overline{a_{i,k/j}}\right)P\left(\overline{a_{j/i,k}}\right) + P\left(a_{i,k}\right)P\left(\overline{a_{i,j/k}}\right)P\left(\overline{a_{k/i}}\right) +$$

$$+P\left(a_{i,k}\right)P\left(a_{i,j/k}\right)P\left(\overline{a_{i/j/k}}\right)P\left(\overline{a_{j,k/i}}\right) + P\left(a_{i,k}\right)P\left(a_{i,j/k}\right)P\left(a_{j,k/i}\right)P\left(\overline{a_{i/j/k}}\right)P\left(\overline{a_{j/i/k}}\right)P\left(\overline{a_{k/i/j}}\right).$$

Заключение

В работе представлен вариант устранения основного недостатка наиболее совершенных модификаций метода, использующих многопеременную инверсию, – необходимости проведения сравнительного анализа каждого слагаемого со всеми ранее рассмотренными на предмет уникальности содержащихся ребер, а также в ряде случаев дополнительных операций над множествами [1, 23, 24]. Согласно данному варианту целесообразно рассматривать не объединение событий связности (несвязности), вырождающееся в сумму несовместных произведений, а пересечение противоположных событий, также приводящее к подобной сумме, но для получения которой нет необходимости выполнять многопеременную инверсию для каждого из слагаемых над всеми ранее проверенными. В итоге результирующее выражение для вероятности исходного графа, получающееся на основе стандартной формы перехода к замещению, задается путем рекурсивной процедуры, анализирующей на каждом шаге не все ранее полученные соотношения, а лишь часть из них.

Список источников

1. Chaturvedi S.K. Network Reliability Measures and Evaluation. Scrivener Publishing LLC, 2016. 237 p.
2. Рябинин И.А., Черкесов Г.Н. Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем. М. : Радио и связь, 1981. 264 с.
3. Батенков К.А. Числовые характеристики структур сетей связи // Труды СПИИРАН. 2017. № 4 (53). С. 5–28.
4. Батенков К.А., Батенков А.А. Анализ и синтез структур сетей связи по детерминированным показателям устойчивости // Труды СПИИРАН. 2018. № 3 (58). С. 128–159.

5. Shengjie Xu, Yi Qian, Rose Qingyang Hu. Reliable and resilient access network design for advanced metering infrastructures in smart grid // IET Smart Grid. 2018. V. 1 (1). P. 24–30.
6. Xu S., Qian Y., Hu R.Q. A data-driven preprocessing scheme on anomaly detection in big data applications // Proc. in 2017 IEEE Conf. on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS), Atlanta, GA, USA, May, 2017. doi: 10.1109/INFCOMW.2017.8116481
7. Ye F., Qian Y., Hu R.Q., et al. Reliable energy-efficient uplink transmission for neighborhood area networks in smart grid // IEEE Trans. Smart Grid. 2015. V. 6 (5). P. 2179–2188.
8. Ye F., Qian Y., Hu R.Q. Energy efficient self-sustaining wireless neighborhood area network design for smart grid // IEEE Trans. Smart Grid. 2015. V. 6 (1). P. 220–229.
9. Ye F., Liang Y., Zhang H. et al. Design and analysis of a wireless sensor based monitoring network for transmission lines in smart grid // Wirel. Commun. Mob. Comput. 2016. V. 16 (10). P. 1209–1220.
10. Xu S., Qian Y. Quantitative study of reliable communication infrastructure in smart grid NAN // Proceedings in Design of Reliable Communication Networks. Kansas City, MO, USA, 2015. doi: 10.1109/DRCN.2015.7148994
11. Zuev K.M., Wu S., Beck J.L. Network reliability problem and its efficient solution by Subset Simulation // Probabilistic Engineering Mechanics. 2015. V. 40. P. 25–35.
12. ГОСТ Р 53111–2008. Устойчивость функционирования сети связи общего пользования. Требования и методы проверки. Введ. 2008-12-18. М. : Стандартинформ, 2009. 16 с.
13. Филин Б.П. Методы анализа структурной надежности сетей связи. М. : Радио и связь, 1988. 208 с.
14. Zhang H.C., Xu D.L., Lu C., Qi E.R., Tian C., Wu Y.S. Connection effect on amplitude death stability of multi-module floating airport // Ocean Eng. 2017. V. 129. P. 46–56.
15. Pino W., Gomes T., Kooij R. A Comparison between Two All-Terminal Reliability Algorithms // Journal of Advances in Computer Networks. 2015. V. 3 (4). P. 284–290.
16. Paredes R., Duenas-Osorio L., Meel K.S., Vardi M.Y. Network Reliability Estimation in Theory and Practice : Preprint submitted to Reliability Engineering & System Safety. 2018. 26 p.
17. Батенков А.А., Батенков К.А., Фокин А.Б. Методы формирования множеств состояний телекоммуникационных сетей для различных мер связности // Труды СПИИРАН. 2020. № 3 (19). С. 644–673.
18. Батенков К.А. Точные и граничные оценки вероятностей связности сетей связи на основе метода полного перебора типовых состояний // Труды СПИИРАН. 2019. Т. 18, № 5. С. 1093–1118.
19. Райгородский А.М. Модели случайных графов и их применения // Труды МФТИ. 2010. Т. 2, № 4. С. 130–140.
20. Lin M., Ting C. A polynomial-time algorithm for computing K-terminal residual reliability of d-trapezoid graphs // Inf. Process. Lett. 2015. V. 115 (2). P. 371–376.
21. Housni K. An Efficient Algorithm for Enumerating all Minimal Paths of a Graph // International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 2019. V. 10. P. 450–460. doi: 10.14569/IJACSA.2019.0100159
22. Bai G.H., Tian Z.G., Zuo M.J. An improved algorithm for finding all minimal paths in a network // Reliability Engineering and System Safety. 2016. V. 150. P. 1–10.
23. Pino W., Gomes T., Kooij R. A Comparison between Two All-Terminal Reliability Algorithms // Journal of Advances in Computer Networks. 2015. V. 3 (4). P. 284–290.
24. Silva J., Gomes T., Tipper D. et al. An effective algorithm for computing all-terminal reliability bounds // Networks, 2015. V. 66 (4). P. 282–295.

References

1. Chaturvedi, S.K. (2016) *Network Reliability Measures and Evaluation.* Scrivener Publishing LLC.
2. Ryabinin, I.A. & Cherkesov, G.N. (1981) *Logiko-veroyatnostnye metody issledovaniya nadezhnosti strukturno-slozhnykh sistem* [Logical-probabilistic methods for studying the reliability of structurally complex systems]. Moscow: Radio i svyaz'.
3. Batenkov, K.A., Batenkov, A.A. & Fokin, A.B. (2020) Methods for generating sets of telecommunication network States for various connectivity measures. *Trudy SPIIRAN – Proceedings of SPIIRAS*. 3(19). pp. 644–673. DOI: 10.15622/sp.2020.19.3.7
4. Batenkov, K.A. (2019) Accurate and boundary estimates of the connectivity probabilities of communication networks based on the method of full iteration of typical States. *Trudy SPIIRAN – Proceedings of SPIIRAS*. 18(5). pp. 1093–1118
5. Shengjie, Xu, Yi Qian & Rose Qingyang Hu. (2018) Reliable and resilient access network design for advanced metering infrastructures in smart grid. *IET Smart Grid*. 1(1). pp. 24–30.
6. Xu, S., Qian, Y. & Hu, R.Q. (2017) A data-driven preprocessing scheme on anomaly detection in big data applications. *Proc. in 2017 IEEE Conf. on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*. Atlanta, GA, USA. DOI: 10.1109/INFCOMW.2017.8116481
7. Ye, F., Qian, Y., Hu, R.Q., et al. (2015) Reliable energy-efficient uplink transmission for neighborhood area networks in smart grid. *IEEE Trans. Smart Grid.* 6(5). pp. 2179–2188.
8. Ye, F., Qian, Y. & Hu, R.Q. (2015) Energy efficient self-sustaining wireless neighborhood area network design for smart grid. *IEEE Trans. Smart Grid*. 6(1). pp. 220–229.
9. Ye, F., Liang, Y., Zhang, H., et al. (2016) Design and analysis of a wireless sensor based monitoring network for transmission lines in smart grid. *Wirel. Commun. Mob. Comput*. 16(10). pp. 1209–1220.

10. Xu, S. & Qian, Y. (2015) Quantitative study of reliable communication infrastructure in smart grid NAN'. *Proc. in Design of Reliable Communication Networks*. Kansas City, MO, USA. DOI: 10.1109/DRCN.2015.7148994
11. Zuev, K. M., Wu, S. & Beck, J. L. (2015) Network reliability problem and its efficient solution by Subset Simulation. *Probabilistic Engineering Mechanics*. 40. pp. 25–35.
12. GOST R 53111–2008. (2009) *Ustoychivost' funktsionirovaniya seti svyazi obshchego pol'zovaniya. Trebovaniya i metody proverki. Vved. 2008-12-18* [Stability of the public communication network. Requirements and verification methods. Introduced December 18, 2008]. Moscow: Standardinform.
13. Filin, B.P. (1988) *Metody analiza strukturnoy nadezhnosti setey svyazi* [Methods for Analyzing the Structural Reliability of Communication Networks]. Moscow: Radio i svyaz'.
14. Zhang, H.C., Xu, D.L., Lu, C., Qi, E. R., Tian, C. & Wu, Y.S. (2017) Connection effect on amplitude death stability of multi-module floating airport. *Ocean Eng*. 129. pp. 46–56.
15. Pino, W., Gomes, T. & Kooij, R. (2015) A Comparison between Two All-Terminal Reliability Algorithms. *Journal of Advances in Computer Networks*. 3(4). pp. 284–290.
16. Paredes, R., Duenas–Osorio, L., Meel, K.S. & Vardi, M.Y. (2018) Network Reliability Estimation in Theory and Practice. *Reliability Engineering & System Safety*. [Preprint].
17. Batenkov, A.A., Batenkov, K.A. & Fokin, A.B. (2017) Numerical characteristics of the structures of communication networks. *Trudy SPIIRAN – Proceedings of SPIIRAS*. 4(53). pp. 5–28.
18. Batenkov, K.A. (2018) Analysis and synthesis of communication network structures based on deterministic stability indicators. *Trudy SPIIRAN – Proceedings of SPIIRAS*. 3(58). pp. 128–159.
19. Raygorodskiy, A.M. (2010) Modeli sluchaynykh grafov i ikh primeneniya [Random graph models and their applications]. *Trudy MFTI*. 2(4). pp. 130–140.
20. Lin, M. & Ting, C. (2015) A polynomial-time algorithm for computing K-terminal residual reliability of d-trapezoid graphs. *Inf. Process. Lett.* 115(2). pp. 371–376. DOI: 10.1016/j.ipl.2014.10.013
21. Housni, K. (2019) An Efficient Algorithm for Enumerating all Minimal Paths of a Graph. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 10. pp. 450–460. DOI: 10.14569/IJACSA.2019.0100159
22. Bai, G.H., Tian, Z.G. & Zuo, M.J. (2016) An improved algorithm for finding all minimal paths in a network. *Reliability Engineering and System Safety*. 150. pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.ress.2016.01.011
23. Pino, W., Gomes, T. & Kooij, R. (2015) A Comparison between Two All-Terminal Reliability Algorithms. *Journal of Advances in Computer Networks*. 3(4). pp. 284–290. DOI: 10.18178/JACN.2015.3.4.183
24. Silva, J., Gomes, T., Tipper, D., et al. (2015) An effective algorithm for computing all-terminal reliability bounds. *Networks*. 66(4). pp. 282–295. DOI: 10.1002/net.21634

Информация об авторах:
Батенков Александр Александрович – профессор, доктор технических наук, профессор Орловского государственного университета им. И.С. Тургенева (Орел, Россия). E-mail: batenkov1957@mail.ru
Батенков Кирилл Александрович – доцент, доктор технических наук, сотрудник Академии Федеральной службы охраны Российской Федерации (Орел, Россия). E-mail: pustur@yandex.ru
Фокин Александр Борисович – сотрудник Академии Федеральной службы охраны Российской Федерации (Орел, Россия). E-mail: tatarin57ru@mail.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Batenkov Aleksandr A. (Doctor of Technical Sciences, Professor, Oryol State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russian Federation). E-mail: batenkov1957@mail.ru
Batenkov Kirill A. (Doctor of Technical Sciences, Accosiative Professor, Academy of Federal Guard Service, Orel, Russian Federation). E-mail: pustur@yandex.ru
Fokin Aleksandr B. (Academy of Federal Guard Service, Orel, Russian Federation). E-mail: tatarin57ru@mail.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию 03.09.2021; принята к публикации 30.05.2022

Received 03.09.2021; accepted for publication 30.05.2022