CUTS USING FOR MODELING THE PROPAGATION OF CASCADING FAILURES IN ELECTRICAL POWER GRIDS

D. A. Migov, A. N. Korotkov*
Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 630090, Novosibirsk, Russia,
*Center for Project Development Petersburg Real Estate LLC, 196066, St. Petersburg, Russia

DOI: 10.24412/2073-0667-2021-3-21-33

Analysis of network reliability is extremely important for their design and operation. For various types of networks, various models have been proposed that take into account network particular features, within which different indicators of network reliability are considered. As a rule, random graphs in various modifications are taken as a basis. Usually, the probability of connectivity of the corresponding random graph in the case of unreliable edges that fail independently and absolutely reliable nodes is used as an indicator of network reliability.

The problems of exact calculating of various reliability indicators are NP-hard. When network elements are subject to dependent failure, reliability analysis becomes a much more time consuming task. A typical example of dependent network failures is cascading failures in power networks. The initiating event of the failure propagation process is caused by external circumstances: it can be a fallen tree, a strong gust of wind, a line break due to overload, etc. If its failure caused overloading of other lines or equipment, then this, in turn, can generate new outages, etc. Thus, a sequence of dependent failures occurs.

An important property of cascade outages in power grids is both their locality and their non-locality, as practice shows. The examples of real cascading outages show that there is a failure of lines along the sections that cut off certain subnets. Such scenarios for the propagation of cascading failures are explained by the fact that the failure of a power transmission line leads to an almost instantaneous redistribution of electricity to other power transmission lines, primarily to those lines that are included in the cut with the failed one. This paper proposes a model for the propagation of dependent failures in a network along its structural cuts.

As a structural model of a power grid, we consider an undirected graph $G = (V, E)$, where V is the set of vertices, and E is the set of edges of the graph G. Let the presence probability be given for each edge. We will interpret this value as the probability of failure-free operation of the corresponding transmission line within a given time interval. If a failure occurs, then a cascade failure begins along the network cuts, the development of which is described by influence graphs. In this case, it is assumed that the vertices are absolutely reliable, i.e. are present with probability equal to 1.

In such conditions, several characteristics are considered as indicators of power network reliability: the probability of network connectivity, the probability of each consumer can connect to any power center, the probability of the availability of any power source for a given proportion of consumers. The last indicator can be more informative than the previous ones when considering a power grid of large dimension, for example, on a national scale, or several countries, if the corresponding networks are interconnected.

The article proposes an algorithm for the accurate calculation of reliability indices, based on the use of the total probability formula, and an estimation algorithm, based on the Monte Carlo approach.

In addition, a method of cumulative updating of the bounds of reliability indicators is proposed, which makes it possible to make a conclusion about the sufficient reliability (or unreliability) of a network in relation to a given threshold.

The pseudocodes of the proposed algorithms and the results of numerical experiments are given.

Key words: power grid, reliability, cascading failure, dependent failure, influence graph.

References

1. Manov N. A., Xoxlov M. V., Chukreev Yu. Ya., Shumilova G. P., Uspenskij M. I., Chukreev M. Yu., Polubotko D. V., Gotman N. E'., Starceva T. B. Metody' i modeli issledovaniya nadezhnosti e'lektroe'nergeticheskix sistem. Komi nauchny'j centr UrO RAN. Sy'kty'vkar, 2010.

2. Shilin A. N., Soshinov A. G., Elfimova O. I., Shilin A. A. Ocenka nadyozhnosti vozdushny'x linij e'lektroperedachi po topologicheskim sxemam s uchyotom vliyaniya pogodny'x uslovij dlya realizacii informacionno-izmeritel'noj sistemy'. VolgGTU, KTI (filial) VolgGTU. Volgograd, 2017.

3. Krupenev D., Boyarkin D., Iakubovskii D. Improvement in the computational efficiency of a technique for assessing the reliability of electric power systems based on the Monte Carlo method // Reliability Engineering and System Safety. 2020. Vol. 204. ID: 107171. DOI: 10.1016/j.ress.2020.107171.

4. Metodicheskie voprosy' issledovaniya nadezhnosti bol'shix sistem e'nergetiki. Vy'p. 61. Problemy' issledovaniya i obespecheniya nadezhnosti liberalizovanny'x sistem e'nergetiki / Otv. red. N. I. Voropaj, A. D. Tevyashev. Irkutsk: ISE'M SO RAN, 2011.

5. Kaplunovich P. A., Turitsyn K. S. Fast selection of $N-2$ contingencies for online security assessment // Proc. of 2013 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PES), 21–25 July 2013, Vancouver. IEEE Press. P. 1–5. DOI: 10.1109/PESMG.2013.6672792.

6. Colbourn Ch. J. The combinatorics of network reliability. N. Y., Oxford Univ. Press, 1987.

7. Cancela H., El Khadiri M., and Petingi L. Polynomial-time topological reductions that preserve the diameter constrained reliability of a communication network // IEEE Trans. on Reliability. 2011. Vol. 60, N 4. P. 845–851.

8. Rodionov A. S., Rodionova O. K. Kumulyativny'e ocenki srednej veroyatnosti svyaznosti pary' vershin sluchajnogo grafa // Problemy informatiki. 2013. Vol. 2. P. 3–12.

9. Rodionov A. S., Khapugin S. A. Modelirovanie gruppovy'x otkazov v analize nadezhnosti setej // Problemy' informatiki. 2015. Vol. 2. P. 31–43.

10. Chen W., Huang N., Kang R. A reliability model with the dependent failures for telecommunication network // Proc. of the 8th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety, Chengdu, 2009. IEEE Press. P. 1129–1132. DOI: 10.1109/ICRMS.2009.5270059.

11. Barrera J., Cancela H., Eduardo M. Topological optimization of reliable networks under dependent failures // Oper. Res. Let. 2015. 43(2). P. 132–136.

12. Chang L., Wub Z. Performance and reliability of electrical power grids under cascading failures // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. Oct. 2011. Vol. 33. N 8. P. 1410–1419.

13. Hines P., Balasubramaniam K., Sanchez E. Cascading failures in power grids // IEEE Potentials. Sept. 2009. Vol. 28. N 5. P. 24–30.

14. Hines P. D. H., Dobson I., Rezaei P. Cascading power outages propagate locally in an influence graph that is not the actual grid topology // IEEE Transactions on Power Systems. March 2017. Vol. 32. N 2. P. 958 — 967.

15. Page L. B., Perry J. E. A practical implementation of the factoring theorem for network reliability // IEEE Trans. on Reliability. 1998. Vol. 37. N 3. P. 259–267.

16. Won J.-M., Karray F. Cumulative update of all-terminal reliability for faster feasibility decision // IEEE Trans. Reliability. 2010. V. 59. N 3. P. 551–562.

17. Rodionov A., Migov D., and Rodionov O. Improvements in the efficiency of cumulative updating of all terminal network reliability // IEEE Trans. Reliability. 2012. V. 61. N 2. P. 460–465.

18. Migov D. A., Vins D. V. Parallel‘naya realizaciya i imitacionnoe modelirovanie ocenki nadyozhnosti seti metodom Monte-Karlo // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie vychislitelnaja tehnika i informatika [Tomsk State University Journal of Control and Computer Science]. 2019. Vol. 47. P. 66–74. DOI: 10.17223/19988605/47/8.

19. Crucitti P., Latora V., Marchiori M. Locating critical lines in high-voltage electrical power grids // Fluctuation and Noise Letters. 2005. Vol. 5. N 2. P. 201–208. DOI 10.1142/S0219477505002562.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ РАЗРЕЗОВ В МОДЕЛИРОВАНИИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КАСКАДНЫХ ОТКАЗОВ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Д. А. Мигов, А. Н. Коротков*

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
630090, Новосибирск, Россия,
*ООО „Центр развития проектов «Петербургская Недвижимость»“,
196066, Санкт-Петербург, Россия

УДК 621.311.1+519.17
DOI: 10.24412/2073-0667-2021-3-21-33

Предлагается модель распространения зависимых отказов в сети по ее структурным разрезам. Подобное может происходить в электроэнергетических сетях: отказ линии электропередачи приводит к практически мгновенному перераспределению электроэнергии на другие линии электропередачи, в первую очередь — на те линии, которые входят в разрез с отказавшей. Для показателей надежности сетей в таких условиях — вероятности связности сети, вероятности связности каждого потребителя с центром питания — разработаны методы их точного и приближенного расчета надежности, а также метод кумулятивного уточнения границ надежности.

Ключевые слова: электроэнергетические сети, надежность, каскадный отказ, зависимый отказ, граф влияний.

Введение. Анализ надежности сетей крайне важен при их проектировании и эксплуатации, исследования на эту тему проводятся уже давно, активно продолжаются и в настоящее время, в том числе и на тему анализа надежности и живучести электроэнергетических сетей [1–5]. При этом для различных типов сетей предложены различные, учитывающие именно их особенности модели, в рамках которых рассматриваются разные показатели надежности сети. Как правило, за основу берутся случайные графы в различных модификациях. Одной из наиболее изученных моделей сети с ненадежными элементами является случайный граф Эрдеша-Реньи [6]. В большинстве случаев используется в качестве показателя надежности сети вероятность связности соответствующего случайного графа в случае ненадежных ребер, отказывающих независимо, и абсолютно надежных узлов. Однако рассматриваются и другие показатели, например — вероятность связности с ограничением на диаметр [7], математическое ожидание числа несвязных пар вершин случайного графа [8] и другие.

Задачи точного расчета указанных показателей надежности являются NP-трудными. Самый очевидный способ расчета — это перебор всех 2^M реализаций графа, где M — количество ненадежных элементов. Однако практически этот метод не используется, в пользу приближенных методов или других точных методов, которые позволяют сократить, иногда значительно, объем вычислений с помощью различных приемов.

Работа поддержана РФФИ в рамках проекта № 18-07-00460.

В случае, когда элементы сети подвержены зависимым отказам [9–11], анализ надежности становится гораздо более трудоемкой задачей. В этих случаях используются, как правило, модели, основанные на марковских процессах. Обычно предполагается, что изначально элементы сети имеют определенные значения надежности, независимые друг от друга. Однако при отказе какого-либо элемента дальнейшие отказы элементов уже носят зависимый характер, т. е. отказ одного элемента провоцирует отказ других. Также предполагается, что отказы происходят за достаточно малые промежутки времени, так чтобы за один такой промежуток происходило не более одного.

Типичный пример зависимых отказов в сети — это каскадные отказы в электроэнергетических сетях [12–14], которые и исследуются в данной статье. Инициирующее событие процесса распространения отказа определяется по внешним обстоятельствам: это может быть упавшее дерево, сильный порыв ветра, обрыв линии из-за перегрузки и т. д. Если же ее отказ вызвал перегрузки других линий или оборудования, то это, в свою очередь, может порождать новые отключения и т. д. — то есть, возникает последовательность зависимых отказов. Одним из значимых результатов в данной области стало построение различных видов так называемых графов зависимостей или графов влияния (influence graph) [14]. Вершины этого графа — ненадежные элементы исходной сети; дуга связывает две вершины, если отказ первого элемента приводит к отказу второго; вес дуги равен вероятности соответствующего отказа. Эти данные (вероятностей зависимых отказов) получаются в основном при помощи имитационного моделирования распространения отказов.

Ниже мы предлагаем новую модель распространения каскадных отказов, учитывая их локальный и нелокальный характер. В ее рамках предлагаются к рассмотрению несколько показателей надежности — вероятность связности сети, вероятность связности каждого потребителя с центром питания и другие. На основе аппарата теории надежности сетей разработаны методы точного и приближенного расчета надежности.

1. Модель распространения зависимых отказов. Важным свойством каскадных отключений в энергосетях является, как показывает практика, как их локальность, так и их нелокальность. На схеме (рис. 1) представлена последовательность отключений в Западной ЭЭС США, 1996 г. Первые три отказа были локальными — по смежным элементам сети, но уже четвертый — через множество устоявших линий, на расстоянии в несколько сотен километров. На этом примере также видно, что характерен отказ линий по разрезам, отсекающим определенные подсети. Например, отказы с номерами 8, 9, 10 или 12, 13, 14, 15, 16, 17, 20. Аналогичная картина была и при другом отказе на востоке США тем же летом.

Такие же закономерности обнаруживаются и при структурном анализе других каскадных отключений в ЭЭС. Объясняются подобные сценарии распространения каскадных отказов тем, что отказ линии электропередачи производит к практически мгновенному перераспределению электроэнергии на другие линии электропередачи, в первую очередь — на те линии, которые входят в разрез с отказавшей.

Трудоемкость задач анализа надежности сетей с зависимыми отказами, в том числе ЭЭС, растет, в общем случае, как факториал от числа ненадежных элементов. Для уменьшения вычислительных затрат предлагается сузить количество возможных вариантов развития каскадов — от всех, включая практически нереализуемые, до наиболее вероятных: по разрезам графа и по смежным элементам. При необходимости можно дополнить пространство возможных траекторий отказов также и другими вариантами, полученными, например, из статистических данных, экспертных оценок или имитационного

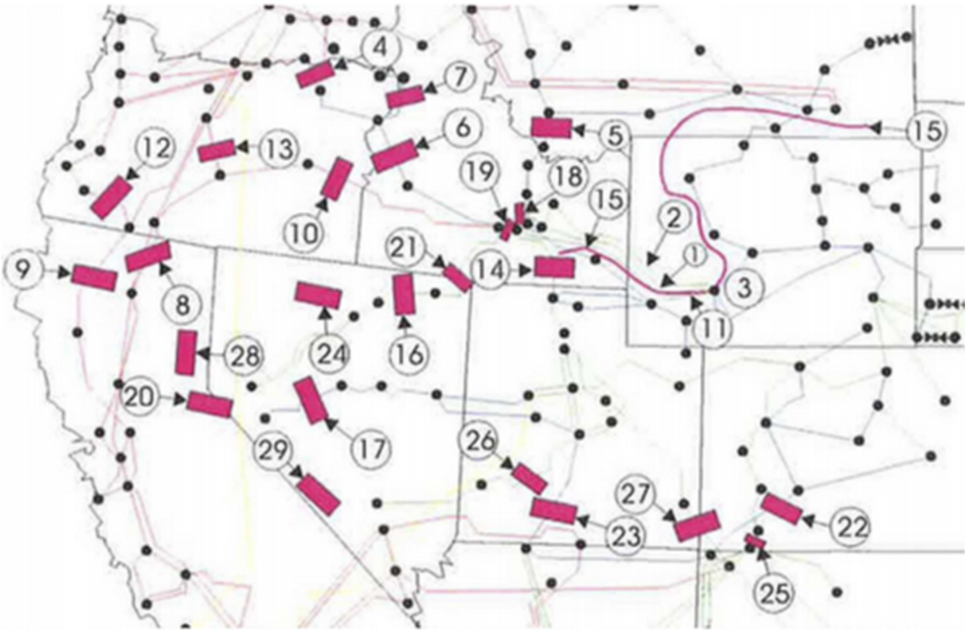

Рис. 1. Схема отключений западной ЭЭС США, 1996 г.

моделирования. С другой стороны, если пользоваться при анализе надежности ЭЭС графом влияний, подобная информация — разрезы графа и смежные элементы — может облегчить его формирование. Основная проблема при получении подобных графов — отсутствие необходимой статистики, которая бы описывала все варианты, в то время как для отказов по разрезам графа и по смежным элементам ЭЭС имеются хоть какие-то данные, в силу частоты развития именно таких сценариев. Кроме того, зная наиболее уязвимые места при выходе из строя какого-либо элемента, появляется возможность максимально уточнять значения соответствующих вероятностей — например, при помощи имитационного моделирования. В последнем случае нет необходимости рассмотрения всех вариантов распространения каскада, а только по разрезам и другим уязвимым местам, что может ускорить процесс имитационного моделирования (т. е. наработки статистики) и повышает его точность.

Также как и при использовании графа зависимостей, будем исходить из предположения, что вероятность выхода из строя элемента на i-м шаге процесса отказов зависит только от того, какой элемент вышел из строя на $(i-1)$-м шаге. При этом на первом шаге элементы считаются отказывающими независимо с вероятностями p_i. На каждом шаге отказывает только один элемент, либо не отказывает ни один вообще, в этом случае каскад считается законченным.

В качестве структурной модели ЭЭС будем использовать неориентированный граф $G = (V, E)$, где V — это множество вершин, а E — множество ребер графа G. Пусть для каждого ребра e задано вещественное число $0 \leqslant p_e \leqslant 1$, т. е. вероятность присутствия ребра e в графе. Будем интерпретировать это число как вероятность безотказной работы соответствующей линии электропередачи в течение заданного интервала времени. При этом предполагается, что вершины абсолютно надежны, т. е. присутствуют с вероятностью, равной 1.

Вероятность изначального отказа хотя бы одного элемента:

$$P(A) = 1 - \prod_{1}^{M} p_i.$$

Вероятность того, что при этом отказал элемент с номером $\boldsymbol{i}$:

$$P(B_i) = \frac{q_i}{\sum_1^M q_i}, \quad q_i = 1 - p_i.$$

Следовательно, вероятность того, что первым отказал $\boldsymbol{i}$-й элемент:

$$Q_i = P(A)\,P(B_i) = \frac{(1 - \prod_1^M p_i)q_i}{\sum_1^M q_i}.$$

Пусть задан граф зависимостей G'.

Зададим дискретное вероятностное пространство $W = (\Omega, P)$.

Ω — пространство элементарных событий (элементарных исходов), образованное множеством всевозможных путей $S_i = (l_1, \ldots, l_n)$ без самопересечения в графе зависимостей G', вероятность такого события будет определяться как

$$P(Q) = Q_e \prod_{n \geqslant l > 1} r_l,$$

где r_l — вес дуги, e — самая первая вершина в пути.

В качестве показателя надежности рассматривают, как правило, вероятность связности сети. В данной работе также предлагается рассматривать такой показатель как вероятность доступности какого-либо источника питания для каждого потребителя в течение определенного времени. Другой показатель — это вероятность доступности какого-либо источника питания для заданной доли потребителей. Такой показатель может быть более информативным, чем предыдущие, при рассмотрении ЭЭС большой размерности, например — в масштабах страны, или нескольких стран, если соответствующие сети объединены.

Все эти показатели формально определяются через соответствующие критерии успешности события. Например, вероятность связности вершин в графе G — вероятность того, что эти вершины связаны исправными ребрами, т. е. вероятность события, состоящего из всех элементарных событий, в которых вершины связаны, и только из них. Вероятность доступности какого-либо источника питания для каждого потребителя $R(G)$ — вероятность события, состоящего из всех элементарных событий, в которых каждая вершина-потребитель связана с какой-либо вершиной-центром питания, и только из них.

2. Метод факторизации в расчете показателей надежности и кумулятивном уточнении их верхней и нижней границ. Расчет надежности непосредственно по определению приведет к перебору всех реализаций графа, что делает расчет невозможным даже при небольшой размерности. Поэтому для расчета различных показателей надежности используются другие методы, самый распространенный из которых — метод факторизации (ветвления, Мура-Шеннона) [15]. Метод заключается в рекурсивном применении формулы полной вероятности при рассмотрении в качестве альтернативных гипотез наличия, либо отсутствия очередного разрешающего ребра. В нашем же случае главной особенностью будет наличие большего числа таких гипотез — по числу исходящих линий в графе влияний (для каждой линий нужно рассмотреть гипотезу ее отказа), плюс еще одной, по которой каскад прекратился. Далее для графа с удаленным ребром также осуществляем факторизацию, и так далее, либо до получения варианта, где каскад прекратился (возвращается 1), либо до получения неуспешного графа (возвращается 0). Например, для расчета вероятности доступности какого-либо источника питания для каждого потребителя граф неуспешный, если какой-либо потребитель оказывается отрезанным от всех центров питания.

Введем ряд обозначений: *P(a)* [Probability] — вероятность текущего события; *TE* [Target Element] — номер элемента, рассматриваемого на текущем шаге; *Adj(i)* [Adjacent] — множество смежных с ***i*** элементов в графе зависимостей; *FE* [Failed Edges] — множество отказавших ребер; *P(a,b)* — вероятность отказа элемента *b* после отказа *a;* *R* — надежность сети.

Булева функция ***Check(FE)*** — проверяет граф, представляемый списком отказавших ребер ***FE***, на критерий успешности. Ниже приведен пример псевдокода такой функции для наличия пути от каждой вершины-потребителя до одной из заданного наперед списка вершин-источников питания S:

```
function Check(FE)
G' := G – FE
for each i in E'
 for each j<>i in S
 if PathCheck(i, j) = true then
 return true
 end
 end
 end
 return false
```

Метод факторизации реализуется при помощи процедуры ***Branching(FE,P,TE)***, которая вычисляет вероятность того, что, при заданных списке уже отказавших ребер, вероятности отказа и целевом элементе, сеть устояла:

```
procedure Branching(FE, P, TE)
R1 := 0
if Check(FE) = true then
 for each i in Adj(TE)
 if I not in FE then
Branching(FE + i, P*P'(TE,i), i)
 R1 = R1 + P'(TE, i)
 end
 end
 R = R + P * (1 – R1)
 end
```

Тогда псевдокод общей программы расчета надежности будет иметь следующий вид:

```
procedure main()
R = 0
 FE := { }
 for TE := 1 to M
Branching(FE + TE, P'(TE), TE)
 end
```

В [16] предлагается другой подход к задаче о надежности сети — ставится задача установить, превосходит ли надежность сети заданное значение (порога), т. е. является ли сеть достаточно надежной? Идея решения данной задачи проста. Каждый раз, когда в процессе ветвления получается подграф, для которого можно вычислить надежность непосредственно, мы уточняем верхнюю и нижнюю границу исходной сети и, если одно из полученных значений пересекает значение порога, принимаем решение о надежности или ненадежности сети. Подход, названный кумулятивным уточнением границ, был далее развит, например, в [17].

Опишем, как осуществлять подобное кумулятивное уточнение границ для рассматриваемых показателей надежности в случае наличия зависимых отказов. Изначально они инициируются как $RL = 0$, $RU = 1$. В теле псевдокода процедуры *Branching* при вызове функции *Check* в случае отрицательного ответа необходимо изменить верхнюю грань: $RU = RU - P$. Нижняя грань уточняется вместе с уточнением точного значения надежности: $RL = RL + P * (1 - R1)$. Используя такой подход, возможно значительно ускорить оптимизацию структуры ЭЭС по критерию надежности. При эвристическом нахождении мест для наиболее надежного размещения центров питания появляется возможность раннего отсеивания неподходящих вариантов.

3. Приближенный расчет на основе метода Монте-Карло. Для оценки различных показателей надежности широко используются методы Монте-Карло [3, 18], способные дать приближенное решение для сколь угодно трудоемких задач.

Опишем общую схему применения методов Монте-Карло к рассматриваемым задачам. Задается характеристическая функция

$$\chi(E) = \begin{cases} 1, E \text{ — успешное событие,} \\ 0, \text{ — в противном случае.} \end{cases}$$

E — элементарное событие, соответствующие частной реализации сети после отказа определенных элементов, в данном случае — после каскадного отключения ребер. Факт успешности E определяется возможностью соответствующей сети успешно функционировать, исходя из практических соображений. Как правило, это определяется различными характеристиками связности. В данном случае E успешно, если в соответствующей сети остается работоспособный путь от каждого потребителя к хотя бы одному из поставщиков ресурса (центру питания).

Тогда вероятность успешного функционирования сети аппроксимируется как:

$$R = M[\chi] \approx \frac{1}{L} \sum_{i=1}^{L} \chi_i, \tag{1}$$

где L — количество выбранных событий.

Согласно ЦПТ, с ростом L вычисляемое приближение R становится все ближе к точному значению:

$$P \left\{ \left| R - \frac{1}{L} \sum_{i=1}^{L} \chi_i \right| \leqslant 3\sigma \right\} \to \ 0{,}9973. \tag{2}$$

Дисперсия случайной величины равна:

$$D(\chi) = M(\chi^2) - M^2(\chi) = R - R^2.$$

Соответственно, дисперсия оценки надежности (среднего значения по выборке) равна:

$$D(R_L) = \frac{L \cdot D(\chi)}{L^2} = \frac{R(1-R)}{L}.$$

А утроенное среднеквадратичное отклонение, которое мы используем для оценки погрешности ε (2), оценивается сверху как:

$$\varepsilon = 3\sigma = 3\sqrt{\frac{R(1-R)}{L}} \leqslant 3\sqrt{\frac{1}{4L}} = \frac{3}{2\sqrt{L}}. \tag{3}$$

Неравенство в центре в выражении (3) имеет место, так как $0 \leqslant R \leqslant 1$.

Таким образом, для количества итераций статистического моделирования

$$L = \frac{9}{4\varepsilon^2}, \tag{4}$$

неравенство (3) выполняется и получаемая оценка надежности (1) верна с погрешностью ε с вероятностью 0,9973 (2).

4. Численные эксперименты. В качестве тестового примера был взят граф одной электросети во Франции [19] (рис. 2), содержащий 141 вершины и 216 ребер. На рисунке слева синей линией обозначен один из разрезов, по трем ребрам, который отделяет 17 вершин. В случае отказа одной из этих трех линий энергопередачи нагрузка перераспределится на две оставшиеся, что, в свою очередь, с высокой вероятностью может вызвать отказы и в них. В зависимости от конфигурации (мощности станций, текущего потребления и пр.) без электричества могут остаться все потребители как в меньшем подграфе, так и в большем, или в различных частях и те, и другие. В качестве входных данных было взято разбиение графа на 7 подграфов (рис. 2) в предположении, что распространение каскадного отказа идет в группах ребер между каждой парой подграфов.

Для экспериментов использовался ПК с процессором Intel Xeon E5450 2,7 GHz. В качестве показателя надежности рассматривалась вероятность существования пути от каждого узла к источнику. Изначальная надежность каждого ребра полагалась 0,99, выбор же дальнейшего развития отказа или его остановки полагался равновероятным по всем вариантам в соответствии с моделью. При расчетах также учитывалось ограничение d на глубину каскадного отказа. Рост значения этого ограничения приводил к значительному увеличению времени расчета. Так, для $d = 8$ точный расчет надежности занял 0,24 с, для $d = 10$ — 1 с, $d = 12$ — 4 с. При ограничении 16 время расчета составило уже 70 с, полученное значение надежности: 0,787863. Оценка методом Монте-Карло дала близкое значение: 0,786287 за 0,2 с.

Заключение. Основной результат статьи — это модель распространения каскадных (зависимых) отказов элементов в сети по ее разрезам. Развитие подобных сценариев характерно для электроэнергетических сетей, когда первый отказ линии, спровоцированный внешними или внутренними причинами, может приводить практически к мгновенной перегрузке и отказу других линий. В качестве основного объекта для описания сценариев отказов был взят граф зависимостей, информация в котором может быть уточнена и дополнена подобными зависимыми отказами по структурным разрезам сети.

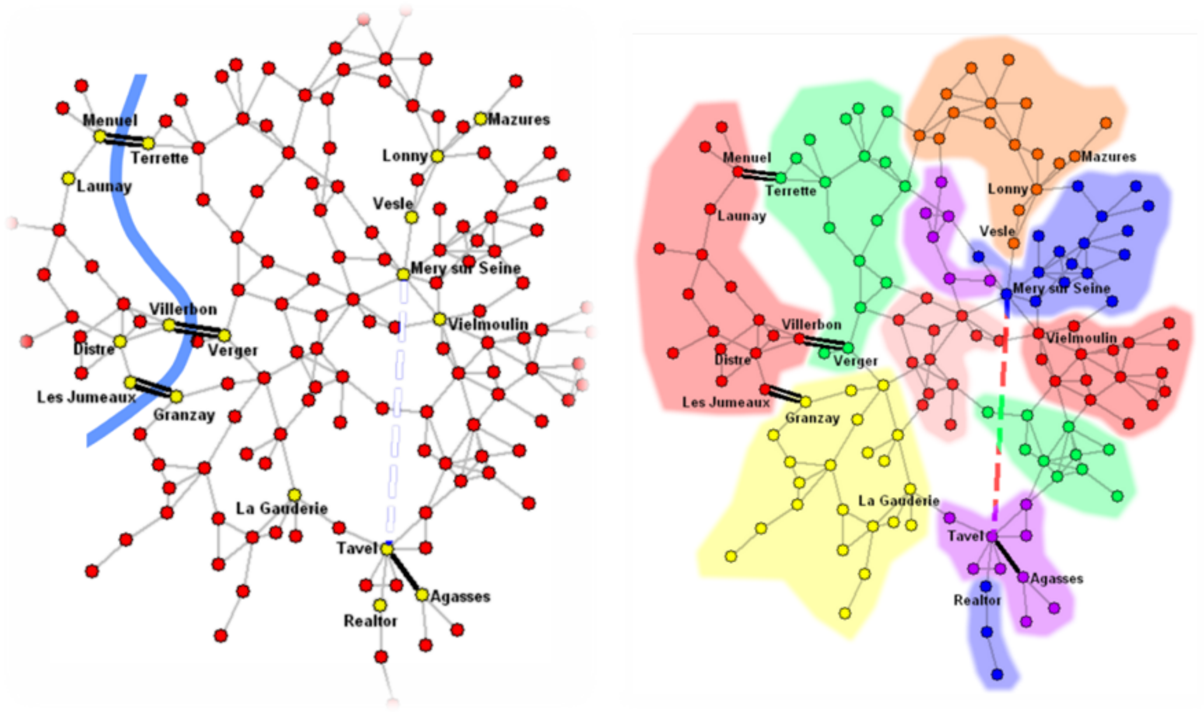

Рис. 2. Пример графа электросети и его структурные компоненты

В рамках данной модели были введены в рассмотрение различные показатели надежности сети. Предложены алгоритм точного их расчета, на основе использования формулы полной вероятности, и алгоритм оценки, на основе метода Монте-Карло. Также предложен метод кумулятивного уточнения границ показателей надежности, позволяющий делать заключение о достаточной надежности/ненадежности сети по отношению к заданному порогу.

Список литературы

1. Манов Н. А., Хохлов М. В., Чукреев Ю. Я., Шумилова Г. П., Успенский М. И., Чукреев М. Ю., Полуботко Д. В., Готман Н. Э., Старцева Т. Б. Методы и модели исследования надежности электроэнергетических систем. Коми научный центр УрО РАН. Сыктывкар, 2010.

2. Шилин А. Н., Сошинов А. Г., Елфимова О. И., Шилин А. А. Оценка надежности воздушных линий электропередачи по топологическим схемам с учетом влияния погодных условий для реализации информационно-измерительной системы. ВолгГТУ, КТИ (филиал) ВолгГТУ. Волгоград, 2017.

3. Krupenev D., Boyarkin D., Iakubovskii D. Improvement in the computational efficiency of a technique for assessing the reliability of electric power systems based on the Monte Carlo method // Reliability Engineering and System Safety. 2020. Vol. 204. ID: 107171. DOI: 10.1016/j.ress.2020.107171.

4. Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Вып. 61. Проблемы исследования и обеспечения надежности либерализованных систем энергетики / Отв. ред. Н. И. Воропай, А. Д. Тевяшев. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2011.

5. Kaplunovich P. A., Turitsyn K. S. Fast selection of $N-2$ contingencies for online security assessment // Proc. of 2013 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PES), 21–25 July 2013, Vancouver. IEEE Press. P. 1–5. DOI: 10.1109/PESMG.2013.6672792.

6. Colbourn Ch. J. The combinatorics of network reliability. N. Y., Oxford Univ. Press, 1987.

7. Cancela H., El Khadiri M., and Petingi L. Polynomial-time topological reductions that preserve the diameter constrained reliability of a communication network // IEEE Trans. on Reliability. 2011. Vol. 60, N 4. P. 845–851.

8. Родионов А. С., Родионова О. К. Кумулятивные оценки средней вероятности связности пары вершин случайного графа // Проблемы информатики. 2013. № 2. С. 3–12.

9. Родионов А. С., Хапугин С. А. Моделирование групповых отказов в анализе надежности сетей // Проблемы информатики. 2015. № 2. С. 31–43.

10. Chen W., Huang N., Kang R.. A reliability model with the dependent failures for telecommunication network // Proc. of the 8th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety, Chengdu, 2009. IEEE Press. P. 1129–1132. DOI: 10.1109/ICRMS.2009.5270059.

11. Barrera J., Cancela H., Eduardo M. Topological optimization of reliable networks under dependent failures // Oper. Res. Let. 2015. 43(2). P. 132–136.

12. Chang L., Wub Z. Performance and reliability of electrical power grids under cascading failures // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. Oct. 2011. Vol. 33. N 8. P. 1410–1419.

13. Hines P., Balasubramaniam K., Sanchez E. Cascading failures in power grids // IEEE Potentials. Sept. 2009. Vol. 28. N 5. P. 24–30.

14. Hines P. D. H., Dobson I., Rezaei P. Cascading power outages propagate locally in an influence graph that is not the actual grid topology // IEEE Transactions on Power Systems. March 2017. Vol. 32. N 2. P. 958 — 967.

15. Page L. B., Perry J. E. A practical implementation of the factoring theorem for network reliability // IEEE Trans. on Reliability. 1998. Vol. 37. N 3. P. 259–267.

16. Won J.-M., Karray F. Cumulative update of all-terminal reliability for faster feasibility decision // IEEE Trans. Reliability. 2010. V. 59. N 3. P. 551–562.

17. Rodionov A., Migov D., and Rodionov O. Improvements in the efficiency of cumulative updating of all terminal network reliability // IEEE Trans. Reliability. 2012. V. 61. N 2. P. 460–465.

18. Мигов Д. А., Винс Д. В. Параллельная реализация и имитационное моделирование оценки надежности сети методом Монте-Карло // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2019. Т. 47. С. 66–74. (DOI: 10.17223/19988605/47/8).

19. Crucitti P., Latora V., Marchiori M. Locating critical lines in high-voltage electrical power grids // Fluctuation and Noise Letters. 2005. Vol. 5. N 2. P. 201–208. DOI 10.1142/S0219477505002562.

Мигов Денис Александрович — канд. физ.-мат. наук, старш. науч. сотр. Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН; 630090, Новосибирск; e-mail: `mdinka@rav.sscc.ru`.

Денис Мигов окончил в 2003 году Механико-математический факультет Новосибирского государственного университета, получив квалификацию „Математик, системный программист“ по специальности „Прикладная математика и информатика“. В 2008 году защитил диссертацию „Расчет вероятности связности случайного графа с применением сечений“ на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 — „Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ“ в диссертационном совете при Институте вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук. В настоящее время является старшим научным сотрудником лаборатории Системного моделирования и оптимизации указанного института. Денис Мигов является дважды лауреатом Именной премии правительства Новосибирской области в 2011 г. и в 2015 г., также неоднократно становился призером различных конференций. Область его научных интересов включает в себя теорию графов, методы анализа надежности сетей, структурную оптимизацию сетей, беспроводные сенсорные сети и параллельные алгоритмы на графах и сетях.

Denis Migov received the diploma of mathematician and programmer in applied mathematics and informatics from the Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia, in 2003. In 2008, he received Ph. D. (Candidate of science) degree in the field of Mathematical modeling, numerical methods, and program complexes from the Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. He is a senior research fellow at the Laboratory of System modeling and optimization of the named institute. Denis Migov is twice a laureate of the Name Prize of the Government of the Novosibirsk Region in 2011 and in 2015; he also repeatedly became a prize-winner of various conferences. His scientific interests are in graph theory, network reliability analysis, network topology optimization, wireless sensor networks, and parallel algorithms on graphs and networks.

Коротков Антон Николаевич — ведущий программист ООО „Центр развития проектов „Петербургская Недвижимость“, 196066, Санкт-Петербург; e-mail: `the.korotkov@gmail.com`.

Антон Коротков окончил в 2016 году бакалавриат факультета информационных технологий Новосибирского государственного университета по направлению подготовки 09.03.01 „Информатика и вычислительная техника“. Тема дипломной работы: „Разработка математических методов и программных средств для расчета надежности сетей с зависимыми отказами элементов“. В настоящее время является ведущим программистом ООО „Центр развития проектов „Петербургская Недвижимость“.

Anton Korotkov graduated in 2016 with a bachelor's degree from the Faculty of Information Technologies of Novosibirsk State University in the field of 09.03.01 Informatics and Computer Engineering. Thesis topic: „Development of mathematical methods and software for calculating the reliability of networks with dependent element failures“. Currently, he is a leading programmer at the Center for Project Development Petersburg Real Estate.

Дата поступления — 27.11.2020