

Оценка клиентоориентированных показателей и исследование надежности системы электроснабжения**

Evaluation of customer orientated indices and reliability study of electrical feeder system

Адितья Тивари^{1*}, Свати Тивари²
Aditya Tiwary^{1*}, Swati Tiwary²

¹Кафедра противопожарной техники и безопасности, Академия IPS, Институт технических и естественных наук, Раджендра Нагар, Индаур (штат Мадхья-Прадеш), Индия, ²Предприниматель, Виджай Нагар, Индаур, Индия
¹Dept. of Fire Technology & Safety Engineering, IPS Academy, Institute of Engineering and science, Rajendra Nagar, Indore (M.P), India, ²Entrepreneur, Vijay Nagar, Indore, India

*raditya2002@gmail.com



Адितья Тивари

Резюме. Цель. Оценка надежности системы, компонента или элемента очень важна в контексте прогнозирования ее готовности и других важных показателей. Надежность – это параметр, который является свидетельством готовности системы при надлежащих условиях эксплуатации в течение заданного периода времени. Исследование различных показателей надежности очень важно, учитывая сложную и неопределенную природу энергосистемы. **Методы.** В работе использованы классические методы теории надежности применительно к системе с постоянной интенсивностью отказов, состоящей из последовательно соединенных элементов. **Выводы.** В настоящей работе выполнен обзор литературы по теме оценки надежности систем электроснабжения. В частности, рассмотрены работы, в которых применялись: марковский подход на основе сечений, подход на основе условной вероятности, имитационные исследования распределительных систем, вероятностные модели, метод Монте-Карло, эквивалентные схемы надежности, метод выборки переходов состояний, методика оптимизации эксплуатационной готовности распределительных систем на основе инспекционного ремонта, метод на основе бутстрэппинга, анализ дерева отказов, метод на основе Байесовых сетей, модель разделения графика нагрузки на пики и впадины, модель реагирования спроса и другие. Авторами выполнена постановка задачи и проведен анализ исходных данных. В работе показано, что с физической точки зрения конфигурация системы будет представлять собой последовательную сеть надежности. При этом система выходит из строя даже при отказе одного компонента, и сохраняет работоспособность, если все компоненты сохраняют работоспособность. Отмечено, что при рассмотрении вопроса надежности последовательных систем тремя основными параметрами надежности являются средняя интенсивность отказов, среднее общее время восстановления в год и среднее время восстановления. В качестве клиентоориентированных показателей, связанных с исследованием надежности в работе применены индекс средней частоты прерываний электроснабжения (System average interruption frequency index, SAIFI), индекс средней длительности прерываний электроснабжения (System average interruption duration index, SAIDI) и индекс средней длительности прерывания электроснабжения одного потребителя (Customer average interruption duration index, CAIDI). На примере восьмиузловой радиальной распределительной системы выполнена оценка надежности по каждой распределительной секции, а также в каждой точке нагрузки. Для рассматриваемых распределительных секций точек нагрузки также получены три основных параметра надежности: средняя интенсивность отказов, среднее время отказа и среднее общее время отказа в год. Для радиальной распределительной системы оценены важные клиентоориентированные показатели: индекс средней частоты прерываний электроснабжения, индекс средней длительности прерываний электроснабжения и индекс средней длительности прерывания электроснабжения одного потребителя. Полученные данные позволяют охарактеризовать надежность и другие связанные с ней показатели, что является актуальным для систем распределения электроэнергии.

Abstract. Aim. Reliability evaluation of a system or component or element is very important in order to predict its availability and other relevant indices. Reliability is the parameter which tells about the availability of the system under proper working conditions for a given period of

** Aditya Tiwary, and Swati Tiwary. «Evaluation of Customer Orientated Indices and Reliability Study of Electrical Feeder System» Reliability: Theory & Applications, vol. 15, no. 3, 2020, pp. 36-43. doi:10.24411/1932-2321-2020-13003

time. The study of different reliability indices are very important considering the complex and uncertain nature of the power system. **Methods.** The study uses classical methods of the reliability theory in respect to a system with a constant failure rate consisting of series-connected elements. **Conclusions.** The paper reviews literature dedicated to the reliability estimation of power supply systems. In particular, the paper examined studies that employed the Markov cut-set approach, the conditional probability approach, distribution systems simulation, probabilistic models, the Monte Carlo method, reliability network equivalent, state transition sampling, inspection repair-based availability optimisation of distribution systems, bootstrapping, fault tree analysis, Bayes networks, peak-valley partition model, demand response model, etc. The authors defined the problem and analysed input data. They showed that, in physical terms, the system configuration will be a series reliability network. Given the above, the system fails even if one component fails, and survives if all of the components survive. It is noted that, when considering the reliability of series systems, the three basic parameters are average failure rate, average annual outage time and average repair time. As the customer orientated indices associated with the research of operational reliability the system average interruption frequency index (SAIFI), the system average interruption duration index (SAIDI) and the customer average interruption duration index (CAIDI) were used. Using the example of an eight-node radial distribution system, reliability was estimated for each distribution section, as well, as at each load point. For the examined distribution sections and load points, three basic reliability parameters were also obtained, i.e., the average failure rate, average outage time and average annual outage time. For a radial distribution system, important customer-oriented indices were estimated, i.e., system average interruption frequency index, system average interruption duration index and customer average interruption duration index. The resultant data allow characterizing reliability and other associated indices, which is relevant for power distribution systems.

Ключевые слова: надежность, готовность, система электроснабжения, индекс средней частоты прерываний электроснабжения, индекс средней длительности прерываний электроснабжения.

Keywords: reliability, availability, electrical feeder system, average interruption frequency index, system average interruption duration index.

Для цитирования: Адитья Тивари, Свати Тивари. Оценка клиентоориентированных показателей и исследование надежности системы электроснабжения // Надежность. 2023. №2. С. 49-56. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-2-49-56>

For citation: Aditya Tiwary, Swati Tiwary. Evaluation of customer orientated indices and reliability study of electrical feeder system. Dependability 2023;2:49-56. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-2-49-56>

Поступила: 27.02.2023 / **После доработки:** 20.04.2023 / **К печати:** 15.06.2023

Received on: 27.02.2023 / **Revised on:** 20.04.2023 / **For printing:** 15.06.2023

1. Введение

Оценка надежности системы, компонента или элемента очень важна в контексте прогнозирования ее готовности и других важных показателей. Надежность – это параметр, который является свидетельством готовности системы при надлежащих условиях эксплуатации в течение заданного периода времени. Сингхом и др. [1] предложен составной марковский подход на основе сечений к оценке надежности систем передачи и распределения, подверженных зависимым отказам. Биллинтоном и др. [2] определены показатели надежности в любой точке составной системы с помощью подхода на основе условной вероятности. Войчинским и др. [3] рассмотрены имитационные исследования распределительных систем, в которых изучается влияние распределений продолжительности прерывания и формы кривых стоимости на оценки стоимости прерывания. Вермой и др. [4] предложены новые показатели, отражающие интеграцию вероятностных моделей и нечетких понятий.

Чжэн и др. [5] разработали однокомпонентную модель и вывели выражение для готовности компонента с учетом допустимого времени восстановления. Джирутитижарун и Сингх [6] представили и проанализировали распределения показателей надежности, полученные с помощью двух методов выборки, а также с помощью метода Монте-Карло. Дзобо и др. [7] исследовали использование функции распределения вероятностей в анализе ценности надежности электроэнергетической системы. Пэ и Ким [8] представили аналитическую методику оценки надежности потребителей в микросети, включающей сети с распределенной генерацией. Биллинтоном и Ван [9] предложили подход к оценке надежности распределительной системы на основе эквивалента сети надежности.

Оценка индексов надежности с учетом отсутствия произвольного времени восстановления для распределительных систем при помощи моделирования по методу Монте-Карло предложена в [10]. Тивари и др.

[11] предложили определение оптимального периода между проверками для распределительной системы на основе готовности с учетом неопределенности времени проверки и времени восстановления. Джирутитижарун и др. [12] разработали сравнение методов моделирования показателей надежности энергосистемы и их распределение. Тивари и др. [13] предложили определение показателей надежности для распределительной системы с использованием метода выборки переходов состояний с учетом случайного отсутствия времени простоя. Тивари и др. [14] предложили методику оптимизации эксплуатационной готовности распределительных систем на основе инспекционного ремонта с использованием оптимизации на основе обучения. В работе [15] предложен метод на основе бутстрэппинга для оценки показателей надежности распределительной системы типа RBTS, не принимающий во внимание произвольное время простоя.

Волканавский и др. [16] предложили способ применения анализа дерева отказов для оценки надежности энергосистемы. Ли и др. [17] изучили влияние применения изолированных воздушных проводов на надежность и безопасность распределения. В работе Тивари и др. [18] получен способ повышения надежности распределительной системы с помощью оптимизации на основе обучения с учетом показателей, относящихся к потребителям и энергии. В работе Тивари и др. [19] получен самоприспосабливающийся многопопуляционный метод оптимизации резерва реактивной мощности на основе алгоритма Джая с учетом ограничений по пределу стабильности напряжения. Авторами [20] разработана эффективная методика на основе бутстрэппинга по оценке показателей надежности распределительной системы, пренебрегающая случайной продолжительностью перерывов. В работе [21] проведено обсуждение влияния изолированных воздушных проводов на надежность и безопасность распределения. Сарантакос и др. [22] представили метод учета состояния компонентов и надежности подстанции при реконфигурации распределительной системы. Батту и др. [23] обсудили метод планирования распределительной системы с учетом надежности с использованием моделирования по методу Монте-Карло.

Тивари и др. [24] обсудили методику оценки надежности радиальной системы распределения электроэнергии. Успенский и др. [25] разработали метод оценки надежности цифровой системы релейной защиты. В работе [26] была создана модель разделения графика нагрузки на пики и впадины и модель реагирования спроса, соответствующая каждому периоду, на основе характеристик пиков и впадин графика нагрузки. В работе [27] обсуждается вероятностный метод оценки влияния распространения электромобилей на показатели надежности системы электроснабжения. В работе [28] предложен единый метод моделирования производительности и надежности на основе Байесовых сетей. В работе [29] обсуждается структура для динамического прогнози-

рования слабых мест в системах передачи электроэнергии на основе несбалансированных данных. Фам и др. [30] предложили метод оценки надежности агрегированной аккумуляторной системы хранения энергии в микросетях в условиях динамической эксплуатации. Мин и др. [31] предложили схему исследования для всесторонней оценки новой политики по использованию возобновляемой энергии в системе электроснабжения в Южной Корее с последовательным использованием трех имитационных моделей.

Дин и др. [32] представили методику оценки надежности реструктуризированной энергосистемы с двусторонней торговлей. О и др. [33] предложили новую методику вероятностной оценки надежности энергосистемы с использованием моделирования по методу Монте-Карло для случая многообъектной системы хранения энергии, установленной на ветряных электростанциях. Шрестха и др. [34] предложили разработку системы оценки операционного соответствия для оперативного планирования магистральных электроэнергетических систем. Гаутам и др. [35] предложили разработку и интеграцию моделей кратковременных событий при оценке надежности активной распределительной системы. Адинольфи и др. [36] предложили многоцелевое оптимальное проектирование фотоэлектрических синхронных повышающих преобразователей с оценкой эффективности, надежности и экономичности. Тивари и др. [37] рассмотрели методологию оценки клиентоориентированных показателей и надежности сложносвязанной системы распределения электроэнергии.

Оценка различных показателей надежности важна для правильной работы распределительной системы. В настоящей работе представлено подробное исследование различных важных показателей надежности. Получены показатели надежности каждой распределительной системы и точки нагрузки. В работе также приведены значения трех основных и трех клиентоориентированных показателей надежности.

2. Оценка надежности последовательной системы

С физической точки зрения конфигурация системы будет представлять собой последовательную сеть надежности. При этом система выходит из строя даже при отказе одного компонента, и сохраняет работоспособность, если все компоненты сохраняют работоспособность.

Система имеет постоянную интенсивность отказов, поэтому надежность системы с постоянной интенсивностью отказов оценивается с помощью следующего соотношения

$$R(t) = e^{-\lambda t}, \quad (1)$$

где $R(t)$ – надежность каждой распределительной секции, λ – интенсивность отказов, 1/год, а t – период времени, который принимается за один год.

Если принять надежность каждого компонента как r_1, r_2, \dots, r_n , то надежность последовательной системы (R_s) определяется как

$$R_s = \prod r_i \quad (2)$$

где r_i – надежность компонентов $i = 1, \dots, n$.

3. Оценка основных показателей надежности последовательной системы

При рассмотрении вопроса надежности последовательных систем тремя основными параметрами надежности являются средняя интенсивность отказов λ_s , среднее общее время восстановления в год U_s и среднее время восстановления r_s , о которых говорится ниже

$$\lambda_s = \sum \lambda_i \quad (3)$$

$$U_s = \sum (\lambda_i r_i), \quad (4)$$

$$r_s = (\sum \lambda_i r_i) / (\sum \lambda_i), \quad (5)$$

где λ_i – интенсивность отказов i -го компонента, 1/год;
 r_i – среднее время восстановления i -го компонента, ч.

4. Оценка клиентоориентированных показателей надежности последовательной системы

Клиентоориентированные показатели, связанные с исследованием надежности – это индекс средней частоты прерываний электроснабжения, индекс средней длительности прерываний электроснабжения и индекс средней длительности прерывания электроснабжения одного потребителя, которые рассмотрены ниже.

Индекс средней частоты прерываний электроснабжения (System average interruption frequency index, SAIFI)

$$SAIFI = \frac{\text{общее число прерываний электроснабжения потребителя}}{\text{общее число обслуживаемых потребителей}}. \quad (6)$$

Индекс средней длительности прерываний электроснабжения (System average interruption duration index, SAIDI)

$$SAIDI = \frac{\text{сумма продолжительностей прерывания электроснабжения потребителя}}{\text{общее число потребителей}}. \quad (7)$$

Индекс средней длительности прерывания электроснабжения одного потребителя (Customer average interruption duration index, CAIDI)

$$CAIDI = \frac{\text{сумма продолжительностей прерывания электроснабжения потребителя}}{\text{общее число прерываний электроснабжения потребителя}}. \quad (8)$$

5. Результаты и обсуждение

Восьмиузловая радиальная распределительная система состоит из семи распределительных сегментов и 7 точек нагрузки от LP-2 до LP-8 (рис. 1) [4].

В табл. 1 [4] приведены исходные данные для радиальной распределительной системы. В табл. 1 приведена частота отказов в год и время восстановления в часах для каждой распределительной секции от 1 до 7 радиальной распределительной системы. В табл. 2 приведено число клиентов в каждой точке нагрузки от LP-2 до LP-8.

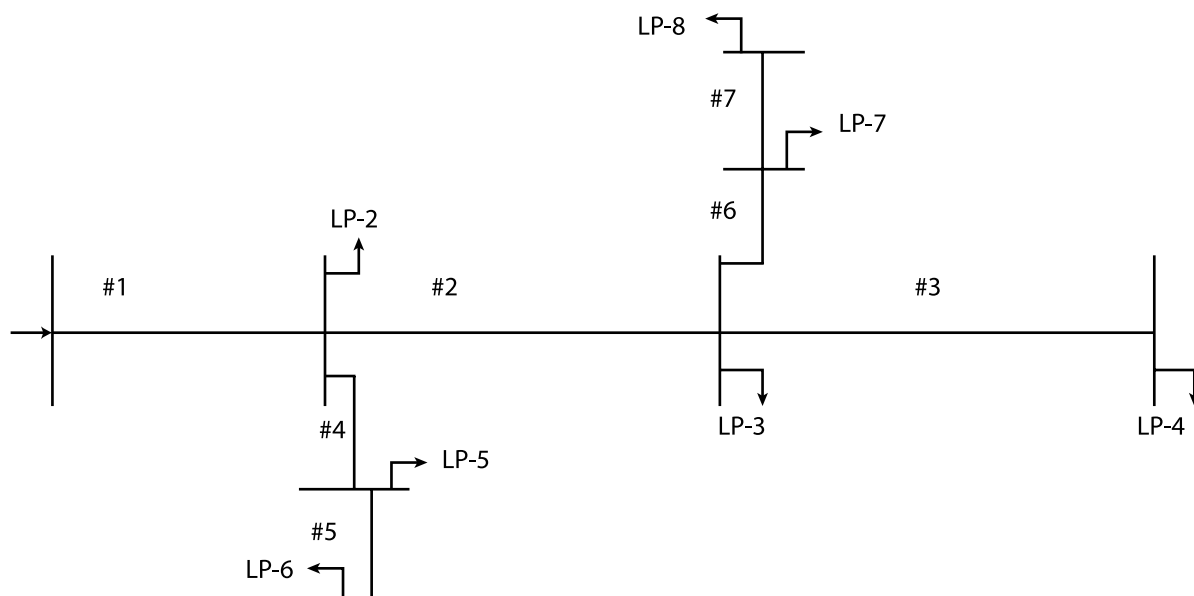


Рис. 1. Восьмиузловая распределительная система

Табл. 1. Исходные данные для радиальной распределительной системы [4]

Распределительная секция	1	2	3	4	5	6	7
λ , отказов/год	0,4	0,2	0,3	0,5	0,2	0,1	0,1
r , среднее время восстановления, часы	10	9	12	20	15	8	12

Табл. 2. Исходные данные для точек нагрузки

Точка нагрузки	2	3	4	5	6	7	8
Число клиентов	1000	800	600	800	500	400	300

Оценка надежности по каждой распределительной секции представлена в табл. 3. Надежность по каждой распределительной секции оценивается с помощью уравнения (1). На рис. 2 показана величина надежности для различных распределительных секций.

Табл. 3. Оценка надежности по каждой распределительной секции

Распределительная секция	Надежность
1	0,6703
2	0,8187
3	0,7408
4	0,6065
5	0,8187
6	0,9048
7	0,9048

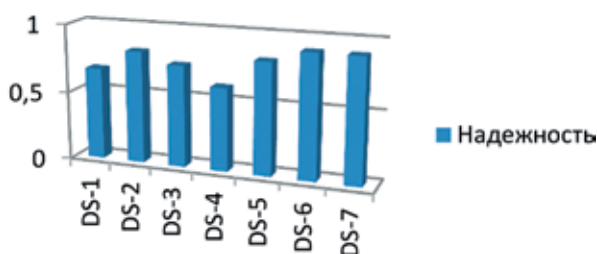


Рис. 2. Значения надежности для различных распределительных секций

В табл. 4 приведены расчетные значения надежности в каждой точке нагрузки радиальной распределительной системы. Надежность в каждой точке нагрузки получена с помощью уравнения (2). На рис. 3 показаны значения надежности в различных точках нагрузки распределительной системы.

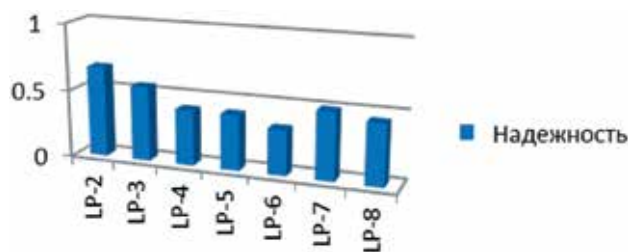


Рис. 3. Значения надежности для различных точек нагрузки

Табл. 4. Оценка надежности в каждой точке нагрузки

Точка нагрузки	Надежность
2	0,6703
3	0,5488
4	0,4065
5	0,4065
6	0,3328
7	0,4965
8	0,4492

Основные показатели надежности в каждой точке нагрузки, т.е. средняя интенсивность отказов, среднее время отказа и среднее общее время отказа в год, представлены в табл. 5.

Получены следующие значения клиентоориентированных показателей радиальной распределительной системы: индекс средней частоты прерываний электроснабжения (SAIFI) – 0,7295, индекс средней длительности прерываний электроснабжения (SAIDI) – 8,8545 и индекс средней длительности прерывания электроснабжения одного потребителя (CAIDI) – 12,1371.

Табл. 5. Оценки основных показателей надежности в каждой точке нагрузки

Точка нагрузки	2	3	4	5	6	7	8
Средняя интенсивность отказов, 1/год	0,4	0,6	0,9	0,9	1,1	0,7	0,8
Средняя длительность отказа, ч	10	9,67	10,4	15,56	15,45	9,42	9,75
Средняя длительность отказа в год, ч	4	5,8	9,4	14	17	6,6	7,8

6. Заключение

Оценка надежности и других связанных с ней показателей крайне важна для системы распределения электроэнергии. В данной работе рассмотрены различные параметры надежности применительно к радиальной распределительной системе. Получены показатели надежности для каждой распределительной секции радиальной распределительной системы. Для каждой точки нагрузки рассматриваемой распределительной системы оценено значение надежности. Для рассматриваемых точек нагрузки также получены три основных параметра надежности: средняя интенсивность отказов, среднее время отказа и среднее общее время отказа в год. Для радиальной распределительной системы также оценены важные клиентоориентированные показатели: индекс средней частоты прерываний электроснабжения, индекс средней длительности прерываний электроснабжения и индекс средней длительности прерывания электроснабжения одного потребителя.

Библиографический список

1. Singh C. Markov cut-set approach for the reliability evaluation of transmission and distribution systems // IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems. 1981. Vol. 100. Pp. 2719-2725.
2. Billinton R. Composite system reliability evaluation // IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems. 1969. Vol. 88. Pp. 276-281.
3. Wojczynski E., Billinton R. Effects of distribution system reliability index distributions upon interruption cost/reliability worth estimates // IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems. 1985. Vol. 11. Pp. 3229-3235.
4. Verma A.K., Srividya A., Kumar H.M.R. A framework using uncertainties in the composite power system reliability evaluation // Electric Power Components and Systems. 2002. Vol. 30. Pp. 679-691.
5. Zheng Z., Cui L., Hawkes A.G. A study on a single-unit Markov repairable system with repair time omission // IEEE Trans. on Reliability. 2006. Vol. 55. Pp. 182-188.
6. Jirutitijaroen P., Singh C. Comparison of simulation methods for power system reliability indexes and their distributions // IEEE Trans. on Power Systems. 2008. Vol. 23. Pp. 486-493.
7. Dzobe O., Gaunt C.T., Herman R. Investigating the use of probability distribution functions in reliability-worth analysis of electric power systems // Int. J. of Electrical Power and Energy Systems. 2012. Vol. 37. Pp. 110-116.
8. Bae I.S., Kim J.O. Reliability evaluation of customers in a microgrid // IEEE Trans. on Power Systems. 2008. Vol. 23. Pp. 1416-1422.
9. Billinton R., Wang P. Reliability-network-equivalent approach to distribution-system-reliability evaluation // IEEE Proc. generation, transmission and distribution. 1998. Vol. 145. Pp. 149-153.
10. Arya L.D., Choube S.C., Arya R. et al. Evaluation of Reliability indices accounting omission of random repair time for distribution systems using Monte Carlo simulation // Int. J. of Electrical Power and Energy System (ELSEVIER). 2012. Vol. 42. Pp. 533-541.
11. Tiwary A., Arya R., Choube S.C. et al. Determination of Optimum period between Inspections for Distribution system based on Availability Accounting Uncertainties in Inspection Time and Repair Time // Journal of The Institution of Engineers (India): series B (Springer). 2012. Vol. 93. Pp. 67-72.
12. Jirutitijaroen P., Singh C. Comparison of simulation methods for power system reliability indexes and their distribution // IEEE Trans Power Syst. 2008. Vol. 23. Pp. 486-493.
13. Tiwary A., Arya R., Choube S.C. et al. Determination of reliability indices for distribution system using a state transition sampling technique accounting random down time omission // Journal of The Institution of Engineers (India): series B (Springer). 2013. Vol. 94. Pp. 71-83.
14. Tiwary A., Arya L.D., Arya R. et al. Inspection repair based availability optimization of distribution systems using Teaching Learning based Optimization // Journal of The Institution of Engineers (India): series B (Springer). 2016. Vol. 97. Pp. 355-365.
15. Tiwary A., Arya R., Arya L.D. et al. Bootstrapping based technique for evaluating reliability indices of RBTS distribution system neglecting random down time // The IUP Journal of Electrical and Electronics Engineering. 2017. Vol. X(2). Pp. 48-57.
16. Volkanavski, Cepin M., Mavko B. Application of fault tree analysis for assessment of the power system reliability // ReliabEngSyst Safety. 2009. Vol. 94. Pp. 1116-1127.
17. BM Li, CT Su, CL Shen. The impact of covered overhead conductors on distribution reliability and safety // Int. J. Electr. Power Energy Syst. 2010. Vol. 32. Pp. 281-289.
18. Tiwary A. Reliability enhancement of distribution system using Teaching Learning based optimization considering customer and energy based indices // International Journal on Future Revolution in Computer Science & Communication Engineering. 2017. Vol. 3. Pp. 58-62.
19. Tiwary A. Self-Adaptive Multi-Population Jaya Algorithm based Reactive Power Reserve Optimization Considering Voltage Stability Margin Constraints // International Journal on Future Revolution in Computer Science & Communication Engineering. 2018. Vol. 4. Pp. 341-345.
20. Arya R., Tiwary A., Choube S.C. et al. A smooth bootstrapping based technique for evaluating distribution system reliability indices neglecting random interruption duration // Int. J. of Electrical Power and Energy System (ELSEVIER). 2013. Vol. 51. Pp. 307-310.
21. BinLi M., TzongSu C., LungShen C. The impact of covered overhead conductors on distribution reliability and safety // Int. J. of Electrical Power and Energy System (ELSEVIER). 2010. Vol. 32. Pp. 281-289.
22. Sarantakos I., Greenwood D.M., Yi J., Blake S.R., Taylor P.C. A method to include component condition and substation reliability into distribution system reconfiguration // Int. J. of Electrical Power and Energy System (ELSEVIER). 2019. Vol. 109. Pp. 122-138.
23. Battu N.R., Abhyankar A.R., Senroy N. Reliability Compliant Distribution System Planning Using Monte Carlo Simulation // Electric power components and systems. 2019. Vol. 47. Pp. 985-997.
24. Tiwary A. Reliability evaluation of radial distribution system – A case study // Int. J. of Reliability: Theory and Applications. 2019. Vol. 14. Pp. 9-13.
25. Uspensky M. Reliability assessment of the digital relay protection system // Int. J. of Reliability: Theory and Applications. 2019. Vol. 14. Pp. 10-17.
26. Li N., Wang X., Zhu Z. et al. The reliability evaluation research of distribution system considering demand response / The 6th International Conference on Power and Energy Systems Engineering (CPESE 2019), Okinawa, Japan.
27. Anand M.P., Bagen B., Rajapakse A. Probabilistic reliability evaluation of distribution systems considering the spatial and temporal distribution of electric vehicles // Int.

J. of Electrical Power & Energy Systems. 2020. Vol. 117. ID: 105609.

28. Ren Yi, Cui B., Feng Q.A. et al. A reliability evaluation method for radial multi-microgrid systems considering distribution network transmission capacity // Computers & Industrial Engineering. 2020. Vol. 139. ID: 106145.

29. Sun C., Wang X., Zheng Y. et al. A framework for dynamic prediction of reliability weaknesses in power transmission systems based on imbalanced data // Int. J. of Electrical Power & Energy Systems. 2020. Vol. 117. ID: 105718.

30. Pham T.T., Kuo T.C., Bui D.M. Reliability evaluation of an aggregate battery energy storage system in microgrids under dynamic operation // Int. J. of Electrical Power & Energy Systems. 2020. Vol. 118. ID: 105786.

31. Min D., Ryu J.H., Choi D.G. Effects of the move towards renewables on the power system reliability and flexibility in South Korea // Energy Reports. 2020. Vol. 6. Pp. 406-417.

32. Ding Y., Wang P., Goel L. et al. Reliability assessment of restructured power systems using reliability network equivalent and pseudo-sequential simulation techniques // Electric Power Systems Research. 2007. Vol. 77. Pp. 1665-1671.

33. Oh U., Lee Y., Choi J. et al. Reliability evaluation of power system considering wind generators coordinated with multi-energy storage systems // IET Generation, Transmission & Distribution. 2019. Vol. 14(5). Pp. 786-796.

34. Shrestha T.K., Karki R., Piya P. Development of an operational adequacy evaluation framework for operational planning of bulk electric power systems // International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering. 2020. Vol. 27(5). P. 2040010.

35. Gautam P., Piya P., Karki R. Development and integration of momentary event models in active distribution system reliability assessment // IEEE Transactions on Power Systems. 2019. Vol. 35(4). Pp. 3236-3246.

36. Adinolfi G., Graditi G., Siano P., Piccolo A. Multiobjective optimal design of photovoltaic synchronous boost converters assessing efficiency, reliability, and cost savings. IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2015. Vol. 11(5). Pp. 1038-1048.

37. Tiwary A. Customer orientated indices and reliability evaluation of meshed power distribution system // Int. J. of Reliability: Theory and Applications. 2020. Vol. 15. No. 1(56). Pp. 10-19.

References

1. Singh C. Markov cut-set approach for the reliability evaluation of transmission and distribution systems. *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems* 1981;100:2719-2725.

2. Billinton R. Composite system reliability evaluation. *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems* 1969;88:276-281.

3. Wojczynski E., Billinton R. Effects of distribution system reliability index distributions upon interruption cost/

reliability worth estimates. *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems* 1985;11:3229-3235.

4. Verma A.K., Srividya A., Kumar H.M.R. A framework using uncertainties in the composite power system reliability evaluation. *Electric Power Components and Systems* 2002;30:679-691.

5. Zheng Z., Cui L., Hawkes A.G. A study on a single-unit Markov repairable system with repair time omission. *IEEE Trans. on Reliability* 2006;55:182-188.

6. Jirutitijaroen P., Singh C. Comparison of simulation methods for power system reliability indexes and their distributions. *IEEE Trans. on Power Systems* 2008;23:486-493.

7. Dzobe O., Gaunt C.T., Herman R. Investigating the use of probability distribution functions in reliability-worth analysis of electric power systems. *Int. J. of Electrical Power and Energy Systems* 2012;37:110-116.

8. Bae I.S., Kim J.O. Reliability evaluation of customers in a microgrid. *IEEE Trans. on Power Systems* 2008;23:1416-1422.

9. Billinton R., Wang P. Reliability-network-equivalent approach to distribution-system-reliability evaluation. *IEEE Proc. generation, transmission and distribution* 1998;145:149-153.

10. Arya L.D., Choube S.C., Arya R. et al. Evaluation of Reliability indices accounting omission of random repair time for distribution systems using Monte Carlo simulation. *Int. J. of Electrical Power and Energy System (ELSEVIER)* 2012;42:533-541.

11. Tiwary A., Arya R., Choube S.C. et al. Determination of Optimum period between Inspections for Distribution system based on Availability Accounting Uncertainties in Inspection Time and Repair Time. *Journal of The Institution of Engineers (India): series B (Springer)* 2012;93:67-72.

12. Jirutitijaroen P., Singh C. Comparison of simulation methods for power system reliability indexes and their distribution. *IEEE Trans Power Syst.* 2008;23: 486-493.

13. Tiwary A., Arya R., Choube S.C. et al. Determination of reliability indices for distribution system using a state transition sampling technique accounting random down time omission. *Journal of The Institution of Engineers (India): series B (Springer)* 2013;94:71-83.

14. Tiwary A., Arya L.D., Arya R. et al. Inspection repair based availability optimization of distribution systems using Teaching Learning based Optimization. *Journal of The Institution of Engineers (India): series B (Springer)* 2016;97:355-365.

15. Tiwary A., Arya R., Arya L.D. et al. Bootstrapping based technique for evaluating reliability indices of RBTS distribution system neglecting random down time. *The IUP Journal of Electrical and Electronics Engineering* 2017;X(2):48-57.

16. Volkanavski, Cepin M., Mavko B. Application of fault tree analysis for assessment of the power system reliability. *ReliabEngSyst Safety* 2009;94:1116-1127.

17. BM Li, CT Su, CL Shen. The impact of covered overhead conductors on distribution reliability and safety. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 2010;32:281-289.

18. Tiwary A. Reliability enhancement of distribution system using Teaching Learning based optimization considering customer and energy based indices. *International Journal on Future Revolution in Computer Science & Communication Engineering* 2017;3:58-62.

19. Tiwary A. Self-Adaptive Multi-Population Jaya Algorithm based Reactive Power Reserve Optimization Considering Voltage Stability Margin Constraints. *International Journal on Future Revolution in Computer Science & Communication Engineering* 2018;4:341-345.

20. Arya R., Tiwary A., Choube S.C. et al. A smooth bootstrapping based technique for evaluating distribution system reliability indices neglecting random interruption duration. *Int. J. of Electrical Power and Energy System (ELSEVIER)* 2013;51:307-310.

21. BinLi M., TzongSu C., LungShen C. The impact of covered overhead conductors on distribution reliability and safety. *Int. J. of Electrical Power and Energy System (ELSEVIER)* 2010;32:281-289.

22. Sarantakos I., Greenwood D.M., Yi J., Blake S.R., Taylor P.C. A method to include component condition and substation reliability into distribution system reconfiguration. *Int. J. of Electrical Power and Energy System (ELSEVIER)* 2019;109:122-138.

23. Battu N.R., Abhyankar A.R., Senroy N. Reliability Compliant Distribution System Planning Using Monte Carlo Simulation. *Electric power components and systems* 2019;47:985-997.

24. Tiwary A. Reliability evaluation of radial distribution system – A case study. *Int. J. of Reliability: Theory and Applications* 2019;14:9-13.

25. Uspensky M. Reliability assessment of the digital relay protection system. *Int. J. of Reliability: Theory and Applications* 2019;14:10-17.

26. Li N., Wang X., Zhu Z. et al. The reliability evaluation research of distribution system considering demand response. In: The 6th International Conference on Power and Energy Systems Engineering (CPESE 2019), Okinawa, Japan.

27. Anand M.P., Bagen B., Rajapakse A. Probabilistic reliability evaluation of distribution systems considering the spatial and temporal distribution of electric vehicles. *Int. J. of Electrical Power & Energy Systems* 2020;117:105609.

28. Ren Yi, Cui B., Feng Q.A. et al. A reliability evaluation method for radial multi-microgrid systems considering distribution network transmission capacity. *Computers & Industrial Engineering* 2020;139:106145.

29. Sun C., Wang X., Zheng Y. et al. A framework for dynamic prediction of reliability weaknesses in power transmission systems based on imbalanced data. *Int. J. of Electrical Power & Energy Systems* 2020;117:105718.

30. Pham T.T., Kuo T.C., Bui D.M. Reliability evaluation of an aggregate battery energy storage system in microgrids under dynamic operation. *Int. J. of Electrical Power & Energy Systems* 2020;118:105786.

31. Min D., Ryu J.H., Choi D.G. Effects of the move towards renewables on the power system reliability and flexibility in South Korea. *Energy Reports* 2020;6:406-417.

32. Ding Y., Wang P., Goel L. et al. Reliability assessment of restructured power systems using reliability network equivalent and pseudo-sequential simulation techniques. *Electric Power Systems Research* 2007;77:1665-1671.

33. Oh U., Lee Y., Choi J. et al. Reliability evaluation of power system considering wind generators coordinated with multi-energy storage systems. *IET Generation, Transmission & Distribution* 2019;14(5):786-796.

34. Shrestha T.K., Karki R., Piya P. Development of an operational adequacy evaluation framework for operational planning of bulk electric power systems. *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering* 2020;27(5):2040010.

35. Gautam P., Piya P., Karki R. Development and integration of momentary event models in active distribution system reliability assessment. *IEEE Transactions on Power Systems* 2019;35(4):3236-3246.

36. Adinolfi G., Graditi G., Siano P., Piccolo A. Multiobjective optimal design of photovoltaic synchronous boost converters assessing efficiency, reliability, and cost savings. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 2015;11(5):1038-1048.

37. Tiwary A. Customer orientated indices and reliability evaluation of meshed power distribution system. *Int. J. of Reliability: Theory and Applications* 2020;1(56):10-19.

Сведения об авторах

Адितья Тивари – кафедра противопожарной техники и безопасности, Академия IPS, Институт технических и естественных наук, Раджендра Нагар, Индаур (штат Мадхья-Прадеш), Индия, e-mail: raditya2002@gmail.com

Свати Тивари – предприниматель, Виджай Нагар, Индаур, Индия.

About the authors

Aditya Tiwary, Dept. of Fire Technology & Safety Engineering, IPS Academy, Institute of Engineering and science, Rajendra Nagar, Indore (M.P), India, e-mail: raditya2002@gmail.com.

Swati Tiwary, Entrepreneur, Vijay Nagar, Indore, India.

Вклад авторов в статью

Адитья Тивари выполнил постановку задачи и оценку основных показателей надёжности, включая клиентоориентированные показатели системы электроснабжения.

Свати Тивари выполнил обзор библиографических источников, участвовал в постановке задачи и анализе исходных данных.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.