Оригинальная статья / Original article
УДК 519.718.2, 621.311
DOI: http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2021-1-57-65

Методы расчета надежности системы электроснабжения

© А.С. Луковенко*, И.В. Зеньков**
**Красноярское предприятие МЭС Сибири, филиал ПАО «ФСК ЕЭС», г. Красноярск, Россия*
***Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, г. Красноярск, Россия*

Резюме: Цель – определение показателей надежности системы электроснабжения с применением модели искусственной нейронной сети. Для разработки модели расчета технической надежности использованы алгоритм расчета показателей надежности систем электроснабжения, метод интенсивности отказов системы электроснабжения, модель прогнозирования с использованием искусственных нейронных сетей. Установлено, что систему электроснабжения образует разомкнутая радиальная схема электроснабжения. Определена интенсивность отказов подсистемы электроснабжения с помощью расчета интенсивности отказов *i*-го элемента подсистемы. В результате рассчитанной вероятности безотказной работы подсистемы для различных условий (5 временных интервалов) установлено, что при увеличении времени эксплуатации со 100 до 500 ч происходит линейное увеличение интенсивности отказов системы с 0,0051 до 0,0073 1/ч. Проведено сравнение полученных значений наработки до отказа основной и такой же резервной подсистемы, находящейся в ненагруженном режиме с абсолютно надежным переключателем (269,62 ч) с основной и такой же резервной подсистемы, находящейся в нагруженном режиме (202,21 ч), значения различны между собой на 67,41 ч, что говорит о более высокой степени надежности первого способа. Разработан программный комплекс «Прогноз_ИНС_2020». В результате сравнения результатов традиционного расчета интенсивности отказов системы электроснабжения и с помощью программного комплекса «Прогноз_ИНС_2020» получена допустимая точность не более 2,17%, что говорит о жизнеспособности данного программного комплекса при расчетах надежности на действующих энергетических предприятиях. Предлагаемые методы оценки технической надежности как с помощью традиционной модели, так и с применением модели на основе искусственной нейронной сети позволяют оценить состояние систем электроснабжения, что способствует предотвращению опасных аварийных ситуаций.

Ключевые слова: система электроснабжения, наработка на отказ, интенсивность отказов, время восстановления, искусственная нейронная сеть

Для цитирования: Луковенко А.С., Зеньков И.В. Методы расчета надежности системы электроснабжения. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25. № 1. С. 57–65. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-1-57-65

Methods for calculating the reliability of power supply systems

Anton S. Lukovenko*, Igor V. Zenkov**
**Krasnoyarsk enterprise MES Siberia Branch of PJSC FGC UES, Krasnoyarsk, Russia*
***Federal Research Center for Information and Computational Technologies, Krasnoyarsk, Russia*

Abstract: The aim was to determine the reliability indicators of a power supply system using an artificial neural network model. A model for calculating technical reliability was developed using the following methods: an algorithm for calculating reliability indicators of power supply systems, the method of failure rate of a power supply system and a forecasting model using artificial neural networks. It was established that a power supply system is formed by an open radial power supply circuit. The failure rate of the power supply subsystem was determined by calculating the failure rate of i-th element of the subsystem. As a result of calculating the probability of failure-free operation of the subsystem for various conditions (5 time intervals), it was found that with an increase in the operating time from 100 to 500 h, a linear increase in the rate of system failures occurs from 0.0051 to 0.0073 1/h. A comparison of the obtained mean-to-failure values of the main and the same backup subsystem in the unloaded mode with an absolutely reliable switch (269.62 h) with the main and the same backup subsystem in the loaded mode (202.21 h) was carried out. The results differ by 67.41 h, which indicates a higher degree of reliability of the first method. The software package Prognoz_INS_2020 was developed. An acceptable accuracy of no more than 2.17% was obtained by comparing the results of the conventional calculation of the failure rate of power supply systems and using the Prognoz_INS_2020 software package. This indicates the efficiency of the proposed software package in reliability calculations at operating energy enterprises. The proposed

methods for assessing technical reliability both using the conventional model and a model based on an artificial neural network made it possible to assess the state of power supply systems, which helps to prevent dangerous emergencies.

Keywords: power supply system, mean time to failure (MTTF), failure rate, recovery time, artificial neural network

For citation: Lukovenko AS, Zenkov IV. Methods for calculating the reliability of power supply systems. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(1):57–65. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-1-57-65

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в России, как и во всем мире, фиксируется возрастающее требование к качеству оказания услуг, и услуги в электроэнергетике не исключение, особенно в части технической надежности системы электроснабжения. Причины возникновения этой тенденции таковы: во-первых, это быстрое распространение сложных производств и систем, требующих постоянства технологических процессов (сложные химические, биотехнологические и полупроводниковые производства, корпоративные системы управления и т.д.). Во-вторых, рост качества жизни населения в развитых странах, ведущий к повышению требований к качеству электроснабжения как на стороне потребителей (распространение бытовых и электронных приборов, чувствительных к перепадам напряжения и силы тока, перерывам в электроснабжении бытовой аппаратуры), так и коммерческого сектора [1–6].

Помимо вышеперечисленных причин немаловажной остается и проблема морально устаревшего оборудования, которое эксплуатируется как в распределительных, так и магистральных электрических сетях [7–9]. Электросетевые организации активно борются с этой проблемой, проводя различные инвестиционные программы, научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, но в связи с большим объемом морально устаревшего и выработавшего нормативный срок службы оборудования отказы неизбежны. Кроме того, единоразово пополнить парк оборудования экономически невозможно [10–11].

О постоянном возврате к вопросу надежности говорят и аналитические отчеты, в которых ежемесячно упоминается об отказах и/или поломках высоковольтного оборудования на электроэнергетических подстанциях, что приводит к выводу из строя не только оборудования, но и всей системы электроснабжения (СЭС) [12–14].

Решению данного вопроса в ПАО «Россети» уделяется немаловажное значение, о чем говорит технологический реестр по основным направлениям инновационного развития.

В технологический реестр включены технологии по основным направлениям инновационного развития ПАО «Россети»[1]:

– переход и масштабное внедрение цифровых подстанций (ЦПС) класса напряжения 35–110 (220) кВ;

– переход к цифровым активно-адаптивным сетям с распределенной интеллектуальной системой автоматизации и управления;

– переход к комплексной эффективности бизнес-процессов и автоматизации систем управления;

– применение новых технологий и материалов в электроэнергетике;

– использование сквозных технологий.

Концепция интеллектуальных электрических сетей (ИЭС) предполагает не только обеспечение некоторого заданного уровня надежности, но и предоставление услуг по его изменению в соответствии с техническими и экономическими предпочтениями потребителя, что подразумевает наличие в сети инструментов для гибкого управления уровнем надежности. Для этого необходимо обеспечить постоянное наблюдение за состоянием сети с оценкой ее показателей надежности [15].

Цель исследования состоит в определе-

[1]Программа инновационного развития ПАО «Россети» на период 2016–2020 гг. с перспективой до 2025 г. М., 2016. 341 с. [Электронный ресурс]. URL: https://www.rosseti.ru/investment/policy_innovation_development/doc/innovation__program.pdf (15.09.2020).

нии показателей надежности системы электроснабжения с применением модели искусственной нейронной сети.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе систему электроснабжения образует разомкнутая радиальная схема электроснабжения. В этой схеме линии электропередачи связывают центр питания (ЦП) с каждым потребителем. Две секции шин в схеме соединений питающей подстанции потребителя соединены секционным выключателем, который в нормальном режиме работы сети находится в отключенном состоянии. При исчезновении напряжения, например, на 1-й секции шин этот выключатель включается автоматикой ввода резервного питания.

Подсистема с точки зрения надежности представляет собой нерезервированную часть системы, элементы которой соединены последовательно. При отказе любого элемента происходит отказ подсистемы[2].

Интенсивность отказов подсистемы электроснабжения определяется по формуле (1):

$$\lambda_{\text{пс}} = \sum_1^n \lambda_i = 0{,}00741791 \text{ ч}, \quad (1)$$

где λ_i – интенсивность отказов *i*-го элемента подсистемы, определяемая по формуле $\lambda_i = \frac{1}{T_i}$; *n* – количество элементов подсистемы, *n* = 10 (значение *n* = 10 принято для рассматриваемой подсистемы).

Результаты вычислений наработки на отказ *i*-го элемента подсистемы и значения интенсивности отказов сведены в табл. 1.

Наработка на отказ подсистемы находится по формуле (2) [12]:

$$T_{\text{пс}} = \frac{1}{\lambda_{\text{пс}}} = \frac{1}{0{,}0074179} = 134{,}8095 \text{ ч}, \quad (2)$$

где $\lambda_{\text{пс}}$ – интенсивность отказов подсистемы.

Вероятность безотказной работы подсистемы определяется по формуле (3):

$$P(t)_{\text{пс}} = e^{-\lambda_{\text{пс}} t} = e^{-0{,}0074179 \cdot 100} = 0{,}476262, \quad (3)$$

где t – наработка подсистемы, за которую определяется вероятность безотказной работы t = 100 ч.

Наработка на отказ и время восстановления *i*-го элемента T_i и $T_{\text{в}i}$ подчиняются экспоненциальному закону распределения. Интенсивность отказов, наработка на отказ и вероятность отказов рассчитываются по формулам (1)–(3).

Среднее время восстановления подсистемы определяется по формуле (4):

$$T_{\text{впс}} = \text{T}_{\text{пс}} \cdot \sum_1^n K_{ni} = \\ = 134{,}8095 \cdot 0{,}050919 = 6{,}864329 \text{ ч}, \quad (4)$$

где K_{ni} – коэффициент простоя *i*-го элемента; $K_{ni} = \frac{T_{\text{в}i}}{T_i}$, $T_{\text{в}i}$ – время восстановления *i*-го элемента.

Таблица 1. Результаты вычислений наработки на отказ *i*-го элемента подсистемы и значения интенсивности отказов

Table 1. Calculation results of mean time to failure of the *i*-th subsystem element and failure rate values

№	Наработка на отказе *i*-го элемента									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ti, ч	1600	1700	1800	1900	2000	900	1000	1100	1200	1300
λi,1/ч	0,000625	0,0005882	0,0005556	0,0005263	0,0005	0,0011111	0,001	0,0009091	0,0008333	0,0007692

Значения K_{ni} для каждого элемента занесены в табл. 2.

Коэффициенты готовности и простоя подсистемы определяются по формулам (4), (5) [16]:

$$\text{К}_{\text{ГПС}} = \frac{\text{T}_{\text{пс}}}{\text{T}_{\text{пс}}+\text{T}_{\text{впс}}} = \frac{134{,}8095}{134{,}8095+6{,}864329} = 0{,}951548; \quad (5)$$

$$K_{\text{ППС}} = \frac{T_{\text{впс}}}{T_{\text{пс}}+\text{T}_{\text{впс}}} = \frac{6{,}864329}{134{,}8095+6{,}864329} = 0{,}048452. \quad (6)$$

[2]Ефимов А.В., Галкин А.Г. Надежность и диагностика систем электроснабжения железных дорог: учебник. М.: УМК МПС России, 2000. 511 с.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ОТКАЗОВ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ В НАГРУЖЕННОМ РЕЖИМЕ

Наработка системы на отказ определяется по формуле (7) [12]:

$$T_c = \frac{1{,}5}{\lambda_{\text{пс}}} = \frac{1{,}5}{0{,}0074179} = 202{,}2136 \text{ ч}, \quad (7)$$

где $\lambda_{\text{пс}}$ – интенсивность отказов подсистемы; 1,5 – коэффициент надежности элементов подсистемы в нагруженном режиме [12].

Вероятность безотказной работы системы с нагруженным резервированием определяется по выражению 8 [12]:

$$P(t)_{\text{с}} = 2e^{-\lambda_{\text{пс}}t} - e^{-2\lambda_{\text{пс}}t} = 2e^{-0{,}0074179\cdot 100} - e^{-2\cdot 0{,}0074179\cdot 100} = 0{,}725698. \quad (8)$$

Интенсивность отказов системы с нагруженным резервированием определяется по формуле 9 [12]:

$$\lambda(t)_{\text{с}} = \frac{2\lambda_{\text{пс}}(1-e^{-\lambda_{\text{пс}}t})}{2-e^{-\lambda_{\text{пс}}t}}. \quad (9)$$

Значения интенсивности отказов рассчитываются при показателе времени t = 0, 100, 200, 300, 400, 500 ч; результаты вычислений показаны в табл. 3.

По данным табл. 3 построена кривая зависимости интенсивности отказов системы от времени эксплуатации (рис. 1).

Наработка системы на отказ определяется по формуле (10):

$$T_c = \frac{2}{\lambda_{\text{пс}}} = \frac{2}{0{,}0074179} = 269{,}6180 \text{ ч}, \quad (10)$$

где 2 – коэффициент надежности элементов подсистемы с абсолютно ненадежным переключателем [12].

После расчета производится сравнение полученных значений наработки системы до отказа по формулам (7) и (10):

$$T_{\text{С7}} = 202{,}2136 \text{ ч}; T_{\text{С10}} = 269{,}6180 \text{ ч}.$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для более точного прогнозирования надежности СЭС и для предупреждения выхода из строя предлагается применять разработанный программный комплекс (ПК) «Прогноз_ИНС_2020», основанный на использовании аппарата искусственных нейронных сетей (ИНС). Положительной составляющей модели ИНС является возможность ее применения в случаях, когда затруднено использование традиционных методов [17–20].

Таблица 2. Коэффициенты простоя элементов подсистемы
Table 2. Downtime coefficients of subsystem elements

№	*t* восстановления *i*-го элемента									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T_i, ч	1600	1700	1800	1900	2000	900	1000	1100	1200	1300
λ_i, 1/ч	0,00063	0,00059	0,00056	0,00053	0,0005	0,00111	0,00100	0,000909	0,00083	0,00077
$T_в$, ч	6	6,5	7	7,5	8	5	6	7	8	9
Kni	0,00375	0,00382	0,00389	0,00395	0,00400	0,00556	0,00600	0,00636	0,00667	0,00692
$\sum_1^n K_{ni}$	0,0500919									

Таблица 3. Значения интенсивности отказов системы с нагруженным резервированием
Table 3. Failure rate values of the system with parallel redundancy

Время эксплуатации, ч	0	100	200	300	400	500
$\lambda(t)$с, 1/ч	0	0,005099	0,006469	0,006994	0,007222	0,007326

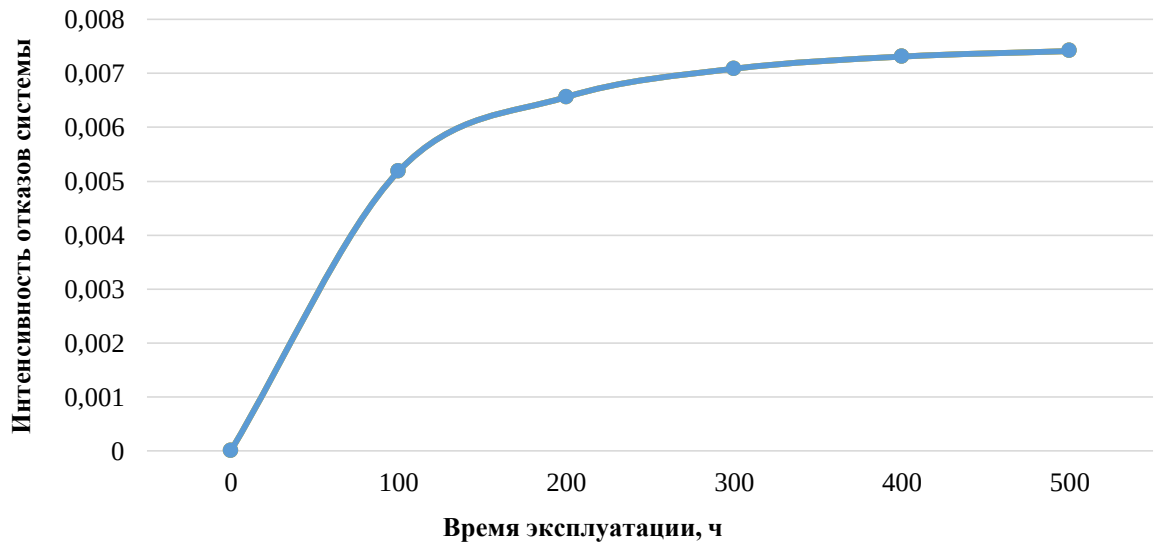

Рис. 1. Интенсивность отказов системы электроснабжения, состоящей из основной подсистемы и такой же резервной, находящейся в нагруженном режиме
Fig. 1. Failure rate of the power supply system including the main subsystem and the same backup system in the parallel mode

Разработанный программный комплекс предназначен для прогнозирования параметров электроснабжения. Расчет прогнозов осуществляется на следующих временных интервалах:

– краткосрочное прогнозирование с упреждением от 1 до 10–15 сут;

– среднесрочное прогнозирование с упреждением от 20 до 60 дней;

– долгосрочное прогнозирование до 1,5 лет.

На главном окне ПК два поля для выбора пути до файлов с исходными данными, а также путь для сохранения результатов прогнозирования, рис. 2.

Есть возможность выбора срока прогнозирования. В рамках первого прототипа реализован только краткосрочный прогноз.

При нажатии кнопки «Запустить» происходит запуск модуля прогнозирования и начинается обучение нейронной сети (см. рис. 2).

В качестве входных данных (статистической базы) заносится предыстория значений интенсивности отказов, наработка на отказ, коэффициенты простоя, рассчитанные при различных временных интервалах.

Рис. 2. Главное окно программного комплекса «Прогноз_ИНС_2020»
Fig. 2. The main window of Prognoz_INS_2020 software package

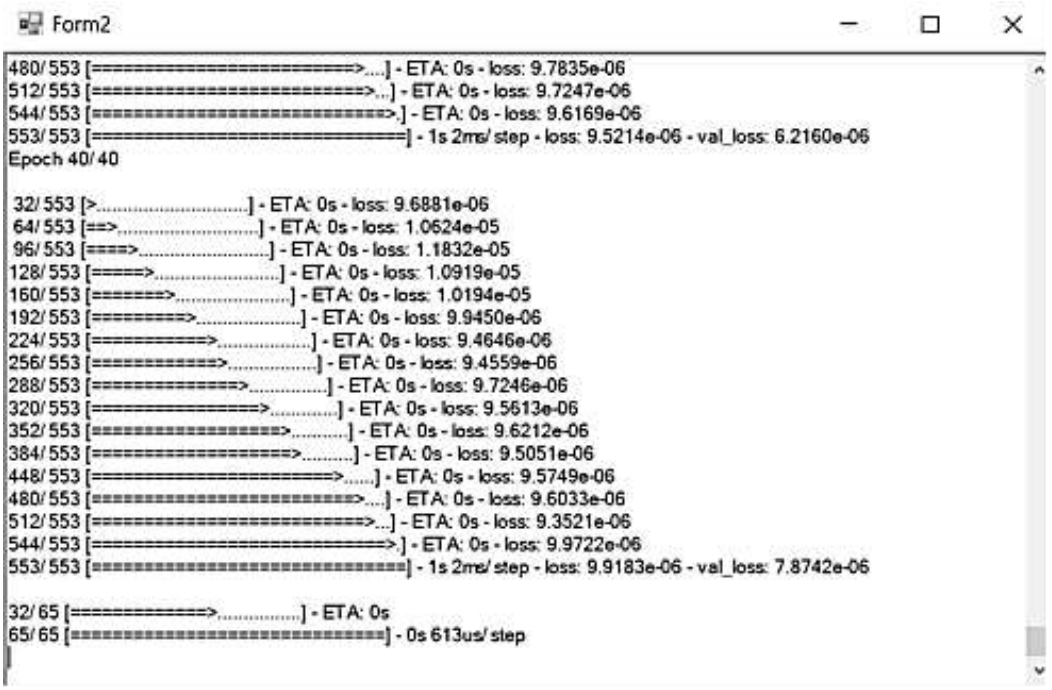

Рис. 3. Процесс обучения искусственной нейронной сети в рамках программного комплекса «Прогноз_ИНС_2020»
Fig. 3. Training process of an artificial neural network within Prognoz_INS_2020 software package

После процесса обучения ИНС в рамках ПК «Прогноз_ИНС_2020» получается график прогноза (рис. 4).

Структура модуля синтеза нейронной сети представляет многослойный персептрон.

Результаты расчета прогнозных значений ИНС с полученными традиционным способом значениями приведены в табл. 4.

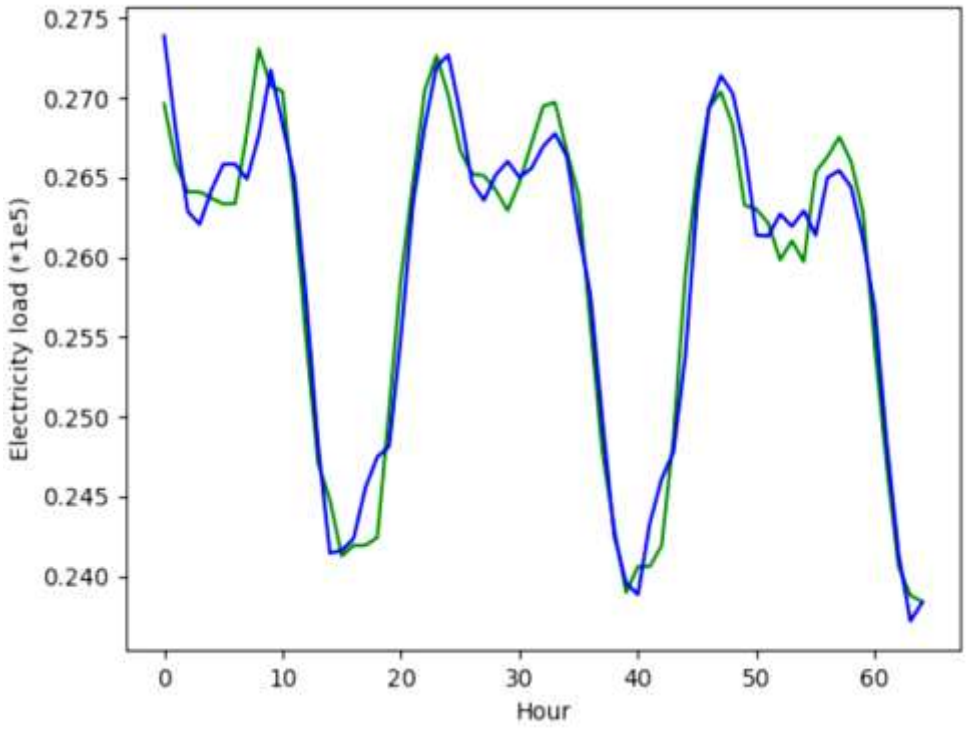

Рис. 4. График прогноза программного комплекса «Прогноз_ИНС_2020»
Fig. 4. Forecast graph of Prognoz_INS_2020 software package

Таблица 4. Результаты расчета надежности системы электроснабжения традиционным методом и методом искусственных нейронных сетей
Table 4. Calculation results of power supply system reliability using a traditional method and a method of artificial neural networks

Значения	Расчет с применением программного комплекса «Прогноз_ИНС_2020»	Традиционный расчет: интенсивность отказа системы (см. табл. 3)	Погрешность, %
0	обучение	–	–
1	0,005210	0,005099	2,17
2	0,006482	0,006469	0,20
3	0,007008	0,006994	0,20
4	0,007104	0,007222	1,63
5	0,007247	0,007326	1,08

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. При сравнении значения наработки СЭС до отказа (T_C) очевидно, что наработка до отказа из основной и такой же резервной подсистемы, находящейся в ненагруженном режиме с абсолютно надежным переключателем, составляет 269,62 ч, что значительно выше наработки до отказа системы, состоящей из основной и такой же резервной подсистемы, находящейся в нагруженном режиме, составляет 202,21 ч, что говорит о более высокой степени надежности применения СЭС, состоящей из основной и такой же резервной подсистемы, находящейся в ненагруженном режиме с абсолютно надежным переключателем.

2. Дано описание разработанного программного комплекса «Прогноз_ИНС_2020» и выполнен сравнительный анализ результатов экспериментальных исследований и теоретических расчетов с помощью данного ПК надежности СЭС, который показал, что погрешность в полученных значениях не превышает 2,17%.

3. При наличии информации о состоянии электрооборудования СЭС появляется возможность выработать рекомендации по режимам работы, эксплуатации и загрузке оборудования без ущербов для их функционирования.

4. Применение модели прогнозирования на основе ИНС позволяет обработать большой объем информации, на основании которой можно сформировать оптимальные режимы работы системы электроснабжения.

Список литературы

1. Рыбаков В.В., Пешехонов Н.Е., Воронин А.Е. Актуальные проблемы учета требований к надежности электроэнергетической системы при построении системы электроснабжения специальных объектов // Известия Тульского государственного университета. 2018. Вып. 10. С. 392–398.
2. Malafeev A., Iuldasheva A. The structural reliability and adequacy assessment of the industrial electric power systems with local power plants // Machines. Technologies. Materials. 2018. Vol. 12. Iss. 4. P. 165–168.
3. Ayuev B.I., Davydov V.V., Erokhin P.M. Fast and reliable method of searching power system marginal states // IEEE Transactions on Power Systems. 2016. Vol. 31. No. 6. P. 4525–4533. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2016.2538299
4. Бык Ф.Л., Мышкина Л.С. Технологическая и эксплуатационная надежность системы электроснабжения // Надежность и безопасность энергетики. 2018. Т. 11. № 3. С. 200–207. https://doi.org/10.24223/1999-5555-2018-11-3-200-207
5. Алейников Д.В. Разработка автоматизированной системы расчета надежности в моделях систем электроснабжения // Прикладная математика и фундаментальная информатика: IX Междунар. молодеж. науч.-практ. конф. с элементами научной школы, посвященная 80-летию со дня рождения академика РАН Ю.Г. Евтушенко (г. Омск, 23–30 апреля 2019 г.). Омск, 2019. С. 85–88.
6. Niwas R. Reliability analysis of a maintenance scheduling model under failure free warranty policy // Reliability: theory & applications. 2018. Vol. 13. No. 3. P. 49–65.
7. Ванин А.С. Определение расчетных состояний системы электроснабжения для анализа показателей надежности // Электричество. 2014. № 3. С. 11–18.
8. Urgun D., Singh C., Vittal V. Importance sampling using multilabel radial basis classification for composite power system reliability evaluation // IEEE Systems Journal. 2020. Vol. 14. Iss. 2. P. 2791–2800. https://doi.org/10.1109/JSYST.2019.2944131
9. Ефимов А.Ю., Алехин А.О. Оценка надежности

электроснабжения потребителей первой и второй категории // Интеллектуальная электротехника. 2019. № 2. С. 74–84.
10. Latipov S.T., Aslanova G.N., Nematov L.A., Akhmedov A.A., Charieva M.R. Calculation of reliability indicators of power supply systems of consumers // Methodological problems in reliability study of large energy systems: E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 139. https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913901037
11. Rahmat M.K., Jovanovic S., Lo K.L. Reliability and availability modelling of uninterruptible power supply systems using Monte-Carlo simulation // International Review of Electrical Engineering. 2006. Vol. 1. No. 3. P. 374–380.
12. Володарский В.А. О расчете надежности систем из элементов нестареющего типа // Методы менеджмента качества. 2017. № 3. С. 50–55.
13. Mantilla-Florez B., Silva-Ortega J., Candelo-Becerra J. Fault effect analysis based on elements loadability to evaluate reliability in power systems // IEEE Latin America Transactions. 2018. Vol. 16. Iss. 10. P. 2649–2656. https://doi.org/10.1109/TLA.2018.8795146
14. Беляев Н.А., Егоров А.Е., Коровкин Н.В., Чудный В.С. Учет критерия балансовой надежности при оптимизации перспективной структуры энергосистемы // Надежность и безопасность энергетики. 2020. Т. 13. № 1. С. 11–16.
https://doi.org/10.24223/1999-5555-2020-13-1-11-16
15. Tsumura T., Takeda T., Hirose K. A tool for calculating reliability of power supply for information and communication technology systems // INTELEC 2008 - 2008 IEEE 30th International Telecommunications Energy Conference (San Diego, 14–18 September 2008). San Diego: IEEE, 2008.
https://doi.org/10.1109/INTLEC.2008.4664080
16. Володарский В.А. Оценка параметров функций распределения при неполноте информации о постепенных отказах электрооборудования // Промышленная энергетика. 2019. № 8. С. 8–13.
17. Амузаде А.С., Танкович Т.И. Анализ показателей надежности систем электроснабжения // Ресурсосберегающие технологии сельского хозяйства: сб. науч. ст. Вып. 11 / под ред. Н.В. Кузьмина, В.А. Козлова, Н.М. Романченко. Красноярск: Изд-во КрасГАУ, 2019. С. 61–66.
18. Христинич Р.М., Луковенко А.С. Прогнозирование надежности и режимов работы тяговых трансформаторов в условиях предельной нагрузки // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2015. № 2. С. 130–136.
19. Карагодин В.В., Ревяков Б.А., Рыбаков Д.В. Подход к определению надежности систем электроснабжения // Труды военно-космической академии имени А.Ф. Можайского Вып. 663. СПб.: Изд-во Военно-космической акад. им. А.Ф. Можайского, 2018. С. 121–125.
20. Луковенко А.С. Повышение надежности работы оборудования электросетевого комплекса с применением нейросетевого моделирования // Электроэнергия. Передача и распределение. 2017. С. 23–30.

References

1. Rybakov VV, Peshehonov NE, Voronin AE. Actual Iss.s of accounting requirements the reliability of the electric energy system when building a power supply system special object. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta = Izvestiya Tula State University*. 2018;10:392–398. (In Russ.)
2. Malafeev A, Iuldasheva A. The structural reliability and adequacy assessment of the industrial electric power systems with local power plants. *Machines. Technologies. Materials*. 2018;12(4):165–168.
3. Ayuev BI, Davydov VV, Erokhin PM. Fast and reliable method of searching power system marginal states. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2016;31(6):4525–4533. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2016.2538299
4. Byk FL, Myshkina LS. Technological and operational reliability of power supply system. *Nadezhnost i bezopasnost energetiki = Safety and Reliability of Power Industry*. 2018;11(3):200–207. (In Russ.)
https://doi.org/10.24223/1999-5555-2018-11-3-200-207
5. Aleynikov DV. Development of automated reliability calculation system in models of power supply systems. *Prikladnaya matematika i fundamental'naya informatika: IX Mezhdunarodnaya molodezhnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya s elementami nauchnoj shkoly, posvyashchennaya 80-letiyu so dnya rozhdeniya akademika RAN Yu.G. Evtushenko* = Applied Mathematics and Fundamental Informatics: IX International youth scientific and practical conference with the elements of a scientific school dedicated to the 80th birth anniversary of the Academician RAS Yu.G. Evtushenko. 23–30 April 2019, Omsk. Omsk; 2019, p. 85–88. (In Russ.)
6. Niwas R. Reliability analysis of a maintenance scheduling model under failure free warranty policy. *Reliability: theory & applications*. 2018;13(3):49–65.
7. Vanin AS. Determination of the calculated states of the power supply system for the reliability indicator analysis. *Elektrichestvo*. 2014;3:11–18. (In Russ.)
8. Urgun D, Singh C, Vittal V. Importance sampling using multilabel radial basis classification for composite power system reliability evaluation. *IEEE Systems Journal*. 2020;14(2):2791–2800.
https://doi.org/10.1109/JSYST.2019.2944131
9. Efimov AYu, Alehin AO. Assessment of reliability of power supply consumers of the first and second category. *Intellektual'naya elektrotekhnika = Smart Electrical Engineering*. 2019;2:74–84. (In Russ.)
10. Latipov ST, Aslanova GN, Nematov LA, Akhmedov AA, Charieva MR. Calculation of reliability indicators of power supply systems of consumers. In: *Methodological problems in reliability study of large energy systems: E3S Web of Conferences*. 2019;139. https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913901037
11. Rahmat MK, Jovanovic S, Lo KL. Reliability and availability modelling of uninterruptible power supply systems

using Monte-Carlo simulation. *International Review of Electrical Engineering*. 2006;1(3):374–380.
12. Volodarskii VA. On calculation of reliability of systems from non-ageing elements. *Metody menedzhmenta kachestva = Methods of quality management*. 2017;3:50–55. (In Russ.)
13. Mantilla-Florez B, Silva-Ortega J, Candelo-Becerra J. Fault effect analysis based on elements loadability to evaluate reliability in power systems. In: *IEEE Latin America Transactions*. 2018;16(10):2649–2656. https://doi.org/10.1109/TLA.2018.8795146
14. Belyaev NA, Egorov AE, Korovkin NV, Chudnyj VS. Consideration of capacity adequacy criterion in optimizing the prospective structure of electric power system. *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki = Safety and Reliability of Power Industry.* 2020;13(1):11–16. https://doi.org/10.24223/1999-5555-2020-13-1-11-16
15. Tsumura T, Takeda T, Hirose K. A tool for calculating reliability of power supply for information and communication technology systems. In: *INTELEC 2008 - 2008 IEEE 30th International Telecommunications Energy Conference*. 14–18 September 2008, San Diego. San Diego: IEEE; 2008. https://doi.org/10.1109/INTLEC.2008.4664080
16. Volodarskii VA. Estimation of distribution function parameters with incompleteness of information on gradual failures of electrical equipment. *Promyshlennaya energetika*. 2019;8:8–13. (In Russ.)
17. Amuzade AS, Tankovich TI. In: NV Kuz'mina, VA Kozlova, NM Romanchenko (eds). Analysis of reliability indicators of power supply sistems. *Resursosberegayushchie tekhnologii sel'skogo hozyajstva* = Agricultural resource-saving technologies. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk State Agrarian University; 2019, p. 61–66. (In Russ.)
18. Khristinich RM, Lukovenko AS. Power transformers reliability and mode of operation in the ultimate load prediction. *Sovremennye tehnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie = Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2015;2:130–136. (In Russ.)
19. Karagodin VV, Revyakov BA, Rybakov DV. An approach to determination of power supply system reliability. *Trudy voenno-kosmicheskoj akademii imeni A.F. Mozhajskogo* = Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy. Saint-Petersburg: the Mozhaisky Military Space Academy. 2018, p. 121–125. (In Russ.)
20. Lukovenko AS. Improving reliability of the power grid complex equipment using neural network modeling. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie*. 2017:23–30. (In Russ.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Луковенко Антон Сергеевич,
кандидат технических наук,
электромонтер по обслуживанию ПС 220 кВ
Тайга – Центральная ГПС,
Красноярское предприятие МЭС Сибири, филиал
ПАО «ФСК ЕЭС»,
660111, г. Красноярск, ул. Пограничников,
105/5, Россия;
✉ e-mail: anlukov2.0@mail.ru

Зеньков Игорь Владимирович,
доктор технических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник,
Федеральный исследовательский центр
информационных и вычислительных технологий,
660049, г. Красноярск, пр. Мира, 53, Россия;
e-mail: zenkoviv@mail.ru

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 13.07.2020; одобрена после рецензирования 27.11.2020; принята к публикации 26.02.2021.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anton S. Lukovenko,
Cand. Sci. (Eng.),
Maintenance Electrician of 220 kV
Tayga Substation – Tsentralnaya Main Substation,
Krasnoyarsk enterprise MES Siberia Branch
of PJSC FGC UES
105/5, Pogranichnikov St., Krasnoyarsk 660111, Russia,
✉ e-mail: anlukov2.0@mail.ru

Igor V. Zenkov,
Dr. Sci. (Eng.), Professor, Leading Researcher,
Federal Research Center for Information
and Computational Technologies,
53 Mira pr., Krasnoyarsk 660049, Russia,
e-mail: zenkoviv@mail.ru

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 13.07.2020; approved after reviewing 27.11.2020; accepted for publication 26.02.2021.