

2.4.3. *Электроэнергетика*

Научная статья

УДК 621.311.001.57

<https://doi.org/10.37493/2307-907X.2024.4.5>

РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТОВ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Юрий Анатольевич Секретарев¹, Андрей Андреевич Горшунов^{2*}^{1,2} Новосибирский государственный технический университет (д. 20, пр-т К. Маркса, Новосибирск, 630073, Российская Федерация)¹ sekretarevua@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7908-9586>² 98sever@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4592-9580>

* Автор, ответственный за переписку

Аннотация. Введение. В статье рассматривается влияние текущего технического состояния электрооборудования на надежность систем электроснабжения. В настоящее время мало распространена или отсутствует статистическая информация, которая помогла бы установить зависимость возникновения отказов в элементах систем электроснабжения от возникновения и развития дефектов в деталях данных элементов при мониторинге их состояния. Помимо этого, также отсутствуют математические модели, которые могли показать связь между этими событиями в оборудовании. **Цель.** Разработка математических моделей для моделирования и учета текущего технического состояния элементов систем электроснабжения при расчетах надежности. **Материалы и методы.** Предложена математическая модель, позволяющая учитывать текущее техническое состояние электрооборудования в расчетах надежности. Математическая модель основана на эвристическом методе получения информации, в модели применяются весовые коэффициенты значимости, полученные в ходе экспертизы. Экспертиза проводилась сотрудниками компании рассматриваемого объекта. Разработана математическая модель для генерирования значений текущего технического состояния элементов и моделирования весовых коэффициентов состояния, для учета дефектов в элементах системы электроснабжения при расчетах надежности. **Результаты и обсуждение.** Представленные математические модели были реализованы в виде программного комплекса для автоматизированного расчета надежности системы электроснабжения и генерирования значений текущего технического состояния на основе метода Монте-Карло. Для расчетов надежности рассматриваемых схем электроснабжения были применены основные показатели надежности элементов, полученные на основе статистической информации об отказах электрооборудования за 10 лет эксплуатации. **Заключение.** Выполнен расчет схемной надежности для рассматриваемых потребителей, проведено моделирование текущего технического состояния для их элементов. Приведено сравнение оценок надежности с учетом и без учета текущего технического состояния.

Ключевые слова: отказы, дефекты, текущее техническое состояние электрооборудования, весовые коэффициенты, моделирование, метод Монте-Карло, системы электроснабжения

Для цитирования: Секретарев Ю. А., Горшунов А. А. Разработка моделей технического состояния электрооборудования для расчетов надежности систем электроснабжения // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2024. № 4 (103). С. 49–58. <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2024.4.5>

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 21.06.2024;
одобрена после рецензирования 15.07.2024;
принята к публикации 20.07.2024.

Research article

DEVELOPMENT OF MODELS OF THE TECHNICAL CONDITION OF ELECTRICAL EQUIPMENT FOR CALCULATING THE RELIABILITY OF POWER SUPPLY SYSTEMS

Yuri A. Sekretarev¹, Andrei A. Gorshunov^{2*}^{1,2} Novosibirsk State Technical University (20, K. Marks ave., Novosibirsk, 630073, Russian Federation)¹ sekretarevua@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7908-9586>² 98sever@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4592-9580>

* Corresponding author

Abstract. Introduction. The article examines the influence of the current technical condition of electrical equipment on the reliability of power supply systems. Currently, there is little or no statistical information available that would help establish the

© Секретарев Ю. А., Горшунов А. А., 2024

dependence of failures in elements of power supply systems on the occurrence and development of defects in the details of these elements when monitoring their condition. In addition, there are also no mathematical models that could show the connection between these events in the equipment. **Goal.** The purpose of the work is to develop mathematical models for modeling and accounting for the current technical condition of elements of power supply systems in reliability calculations. **Materials and methods.** A mathematical model is proposed that allows taking into account the current technical condition of electrical equipment in reliability calculations. The mathematical model is based on a heuristic method of obtaining information, the weighting coefficients of significance obtained during the examination are used in the model. The examination was carried out by employees of the company of the object in question. A mathematical model has been developed to generate the values of the current technical condition of the elements and to model the weight coefficients of the condition, to account for defects in the elements of the power supply system when calculating reliability. **Results and discussion.** The presented mathematical models were implemented in the form of a software package for automated calculation of the reliability of the power supply system and generation of values of the current technical condition based on the Monte Carlo method. To calculate the reliability of the considered power supply schemes, the main reliability indicators of the elements were used, obtained on the basis of statistical information on failures of electrical equipment over 10 years of operation. **Conclusion.** The calculation of circuit reliability for the consumers in question has been performed, and the current technical condition for their elements has been simulated. A comparison of reliability estimates with and without taking into account the current technical condition is given.

Keywords: failures, defects, current technical condition of electrical equipment, weight coefficients, modeling, Monte Carlo method, power supply systems

For citation: Sekretarev YuA, Gorshunov AA. Development of models of the technical condition of electrical equipment for calculating of reliability of power supply systems. Newsletter of North-Caucasus Federal University. 2024;4(103):49-58. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2024.4.5>

Conflict of interest: the authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted 21.06.2024;

approved after reviewing 15.07.2024;

accepted for publication 20.07.2024.

Введение / Introduction. В настоящее время процесс мониторинга за техническим состоянием электрооборудования достаточно усложнен из-за отсутствия математических моделей, которые могли бы точно описывать влияние развития дефектов (в общем случае влияние текущего технического состояния) на отказы оборудования и последствиями этих отказов. Это связано с рядом факторов [1, 2].

Дефекты, возникающие в элементах оборудования, и процессы их развития могут быть разнообразными и зависеть от множества параметров (материал оборудования, условия эксплуатации, возраст оборудования, предыдущее техническое обслуживание и т. д.), что усложняет создание универсальных моделей.

Режимы оборудования могут значительно варьироваться и оказывать существенное влияние на скорость развития дефектов и вероятность отказа. Различные типы оборудования (например, трансформаторы, выключатели, линии электропередач) подвержены разным видам дефектов и отказов.

Для более точного описания процессов возникновения дефектов и отказов необходимо учитывать большое количество переменных и их взаимосвязи, что приводит к необходимости построения сложных математических моделей, требующих значительных вычислительных ресурсов и специализированных знаний для их разработки и использования. Данные модели требуют постоянного совершенствования и адаптации к специфике конкретных видов оборудования и условий их эксплуатации [3].

Сегодня при принятии решения о выводе оборудования в плановый ремонт часто применяются предиктивные модели, обладающие существенным недостатком. Моделям данного типа необходимо обучение на архивных многолетних показателях [4]. Необходима статистическая информация, которая на сегодняшний день отсутствует или недостаточна для работы математических моделей.

Материалы и методы исследований / Materials and methods of research. Существует большое количество оборудования, за которым не осуществляется мониторинг состояния в режиме реального времени [5]. Для учета текущего технического состояния электрооборудования в расчетах надежности систем электроснабжения (СЭС) предлагается применять данную математическую модель:

$$P_{ИТС} = P \cdot J_{k,лт,eq} = e^{-\omega \cdot I} \cdot J_{k,лт,eq}, \quad (1)$$

где P – вероятность безотказной работы СЭС; $Jk.un.eq$ – индекс технического состояния электрооборудования; ω – суммарный параметр потока отказов элементов СЭС, год⁻¹; T – время, за которое рассматривается событие, год.

Техническое состояние каждой единицы электрооборудования, входящей в состав СЭС, не является постоянной величиной. Причины данного различия разнообразны.

На протяжении всего времени эксплуатации на электрооборудовании СЭС промышленных предприятий проводятся как планово-предупредительные ремонты (ППР), так и текущие внеплановые ремонты. Любой тип ремонта не восстанавливает технического состояния до первоначального уровня [6, 7].

На сегодняшний день производить оценку надежности СЭС с учетом текущего технического состояния элементов представляется практически невыполнимой задачей. Отсутствие или эпизодический мониторинг за техническим состоянием электрооборудования СЭС не позволяет получить комплексную оценку надежности. Как уже отмечалось, это связано с отсутствием информации о влиянии дефектов на отказы элементов СЭС. При такой ситуации оценка надежности СЭС приводит к ее оптимистическому завышению.

Отказ того или иного элемента в составе СЭС может приводить к недоотпуску электроэнергии и в зависимости от потребителя (технологические особенности производства) к различным отрицательным экономическим последствиям (ущербам). Разработка сценариев последствий вследствие отказов электрооборудования в СЭС изучена, однако отсутствуют математические модели, показывающие явную связь между развитием дефекта в деталях электрооборудования и отказом данного электрооборудования. По данной причине невозможно составить сценарии последствий отказа элемента СЭС, обладая информацией о текущем техническом состоянии рассматриваемого элемента.

На рис. 1 представлена структурная модель причинно-следственной связи между возникновением и развитием дефекта в элементе и последующим его отказом.



Рис. 1. Причинно-следственная связь между дефектами и отказами элементов СЭС /

Fig. 1. Causal relationship between defects and failures of PSS elements

*Источник: составлено авторами / *Source: compiled by the authors

Остановимся более подробно на рис. 1. Наиболее слабым звеном в данном процессе является отсутствие математической модели, описывающей влияние события 1 (дефекта оборудования) на событие 2 (отказ оборудования). Для ее получения отсутствует как детерминированная, так и статистическая информация, описывающая это влияние. Поэтому такая модель может быть

построена на базе неопределенной информации. Она может быть получена различными эвристическими методами, которые основываются либо на аппарате экспертных оценок, либо на теории нечетких множеств.

В условиях неопределенности целесообразно получить приближенные ответы на наиболее важные вопросы, чем пытаться дать точные ответы на вопросы, которые не полностью осмысленны [8]. Этот принцип положен в основу экспертных оценок. Опыт, базирующийся на накопленных знаниях о конструкции и функциональных особенностях оборудования, позволяет экспертам давать необходимые оценки (веса) при неопределенности (отсутствии) информации. Полученная оценка обладает управленческой объективностью при выполнении двух условий:

- 1) использование достаточно строгих логических процедур получения оценок для взвешивания интересующих факторов;
- 2) полученная оценка факторов должна характеризоваться достаточной степенью согласованности экспертов по оцениваемым параметрам.

Последствия отказов (событие 3) могут быть оценены отрицательным экономическим эффектом – ущербом. В зависимости от объекта могут быть составлены и рассмотрены различные сценарии, в которых отказ того или иного элемента приводит к определенным последствиям. Составив сценарии, появляется возможность дать оценку риска R отказа рассматриваемого элемента СЭС. Риск может быть представлен в виде денежного эквивалента (ущерба). Появляется «цена» отказа рассматриваемого элемента. Различные сценарии могут быть рассмотрены ЛПР для принятия решения о выводе электрооборудования в ремонт. В качестве критерия минимизации при этом принимается минимум ущерба.

Чтобы произвести оценку текущего технического состояния электрооборудования применяется индекс технического состояния (ИТС). Данный показатель является комплексной оценкой текущего технического состояния элемента СЭС. Для получения значения ИТС следует произвести оценку технического состояния каждой детали в рассматриваемом элементе СЭС. При этом детали образуют функциональные узлы. Далее производится расчет ИТС функциональных узлов на основе полученных ранее оценок. Применяя рассчитанные значения ИТС функциональных узлов, в конечном итоге, производится расчет ИТС единицы электрооборудования.

Техническое состояние разных деталей и функциональных узлов оказывает неравное влияние на элемент СЭС. Чтобы оценить важность (значимость) детали или функционального узла в составе единицы электрооборудования применяются весовые коэффициенты значимости V . Данные коэффициенты могут быть получены с помощью процедуры экспертных оценок. Значение ИТС элемента СЭС может быть получено с помощью математической модели

$$J_{k.un.eq} = \sum_1^j V_j \cdot \left(\sum_1^i (V_i \cdot O_i) \right), \quad (2)$$

где V_i – весовой коэффициент значимости детали; O_i – весовой коэффициент (оценка) состояния детали; V_j – весовой коэффициент значимости функционального узла; i – количество деталей в составе функционального узла; j – количество функциональных узлов в составе элемента СЭС.

В ПАО «Газпромнефть» была проведена экспертиза и получены весовые оценки (коэффициенты) значимости деталей и функциональных узлов воздушных линий 35 кВ и силовых трансформаторов.

Исходные данные и результаты нормирования по ним приведены в таблицах 1, 2, 3. Для использования данных весовых коэффициентов в разработанной математической модели (2) необходимо пронормировать их по выражению

$$V_i^{norm} = V_j \cdot V_i. \quad (3)$$

Таблица 1 / Table 1

**Весовые коэффициенты значимости ВЛ 35 кВ / Weight coefficients of significance
of 35 kV overhead line**

Функциональный узел	Весовые коэффициенты (значимости) функциональных узлов V_i	Деталь	Весовые коэффициенты (значимости) деталей V_i
Опора	0,334	Крепления	0,3
		Подкосы и стойки	0,1
		Изоляторы, траверсы, крюки	0,2
		Заземляющие устройства	0,1
		Разрядники	0,3
Пролет	0,666	Трасса ВЛ	0,3
		Провода	0,7

*Источник: составлено авторами / *Source: compiled by the authors

Таблица 2 / Table 2

**Результат нормирования весовых коэффициентов значимости ВЛ 35 кВ / The result
of the normalization of the weighting coefficients of the significance of 35 kV overhead lines**

Единица электрооборудования	Деталь	Весовые коэффициенты (значимости) V_i
Воздушная линия 35 кВ	Крепления	0,1
	Подкосы и стойки	0,03
	Изоляторы, траверсы, крюки	0,07
	Заземляющие устройства	0,03
	Разрядники	0,1
	Трасса ВЛ	0,2
	Провода	0,47

*Источник: составлено авторами / *Source: compiled by the authors

Следует отметить, что весовые коэффициенты деталей, относящихся к функциональному узлу «Пролет двухцепной воздушной линии», необходимо увеличить в 2 раза. Дефекты, возникающие в каждой цепи, рассматриваются отдельно.

Аналогично нормирование было проведено для весовых коэффициентов трансформатора. Результаты приведены в таблице 3.

Таблица 3 / Table 3

**Результат нормирования весовых коэффициентов трансформатора / The result
of normalization of transformer weight coefficients**

Единица электрооборудования	Деталь	Весовые коэффициенты (значимости) V_i
Трансформатор	Изоляционная система	0,32
	Магнитная система	0,18
	Обмотки	0,18
	Высоковольтный ввод	0,13
	Устройство РПН	0,1
	Система охлаждения	0,09

*Источник: составлено авторами / *Source: compiled by the authors

Нормирование весовых коэффициентов позволяет упростить модель (2) и получить выражение

$$J_{k.un.eq} = \left(\sum_1^i V_i^{norm} \cdot O_i \right), \quad (4)$$

где V_i^{norm} – нормированный весовой коэффициент значимости детали.

Применяя информацию о техническом состоянии деталей, может быть получено значение ИТС единицы электрооборудования. Данная информация может быть получена путем мониторинга за техническим состоянием электрооборудования, помимо этого информация может быть получена с помощью процедуры экспертных оценок или с помощью моделирования.

Результаты исследований и их обсуждение / Research results and their discussion. Метод Монте-Карло – это статистический метод моделирования, который используется для решения различных технических, математических, экономических и других задач с помощью моделирования большого количества случайных событий. Метод позволяет получить приблизительные решения, даже если статистическая информация недоступна, метод может использоваться для генерации данных, основанных на предположениях о распределении генерируемой величины. Это позволяет получать приблизительные оценки [9].

Псевдослучайные числа играют центральную роль в методе Монте-Карло, в том числе при моделировании технического состояния оборудования или систем. Псевдослучайные числа генерируются алгоритмически, что обеспечивает их генерацию, в отличие от истинно случайных чисел, которые не могут быть получены точно.

Для учета дефектов в элементах СЭС при расчетах надежности предполагается, что событие, связанное с возникновением дефектов, является случайным. Так как диапазон изменения дефекта находится в пределах от 0 (влияние дефекта детали на возможный отказ всего элемента отсутствует) до 1 (дефект детали обязательно приведет к отказу элемента), то предлагается использовать датчик равномерного распределения вероятностей псевдослучайных чисел (RANDOM), имеющий такой же диапазон изменения.

Второе важное замечание касается предмета моделирования. Так как дефекты выражаются весовыми коэффициентами, то предлагается моделировать величины самих весовых показателей, нормированные значения которых находятся также в диапазоне от 0 до 1. Комбинация метода экспертных оценок и метода статистических испытаний (метода Монте-Карло) позволяет решить поставленную задачу, связанную с осуществлением качественного мониторинга технического состояния линий электропередачи и силовых трансформаторов, образующих СЭС.

В такой постановке текущий индекс технического состояния k -го элемента СЭС может быть получен по выражению

$$J_{k.un.eq} = \sum_1^i \left[\left(\frac{\sum_1^n RANDOM}{n} \right) \cdot V_i \right], \quad (5)$$

где $RANDOM$ – генератор псевдослучайных чисел, генерирующий в пределах от 0 до 1; n – количество испытаний; V_i – весовой коэффициент значимости детали; i – количество деталей в единице электрооборудования.

Таким образом, проведение n испытаний с помощью генератора псевдослучайных чисел $RANDOM$ позволяет получить выборку значений индекса технического состояния (ИТС) деталей единицы электрооборудования. При этом генератор псевдослучайных чисел имитирует весовой коэффициент (оценку) состояния детали O_i в математической модели (1). Сумма значений ИТС всех деталей позволяет получить комплексный показатель текущего технического состояния всей единицы электрооборудования.

Все расчеты проводились автоматизировано с помощью программного комплекса, разработанного на основе предложенной модели (5) с применением метода Монте-Карло для моделирования ИТС [10]. Исследование надежности СЭС с учетом текущего технического состояния элементов проводилось для группы потребителей Салымского месторождения. Основные показатели надежности были рассчитаны на основе статистической информации об отказах электрооборудования за 10 лет эксплуатации данных объектов [11, 12]. Параметр потока отказов для ВЛ составил $\omega = 0,018$ год⁻¹/1 км. Среднее время восстановления составило $T_v = 3,94$ ч.

Всего рассматривалось 50 схем потребителей. Схема одного из потребителей представлена на рис. 2. Блок-схема для расчета надежности с учетом текущего технического состояния электрооборудования представлена на рис. 3.

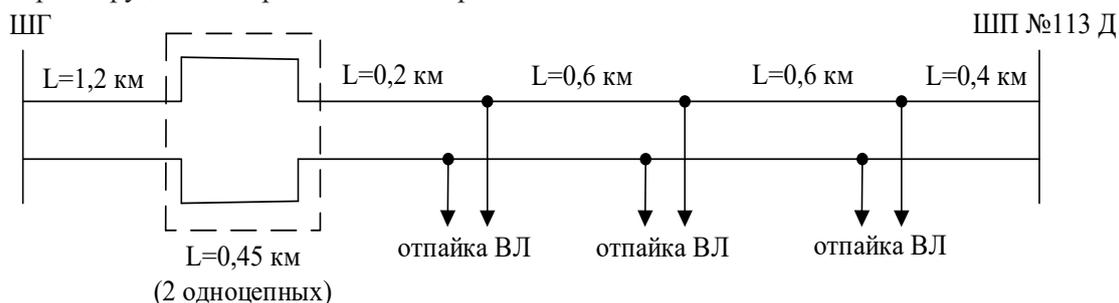


Рис. 2. Схема рассматриваемого потребителя / Fig. 2. The scheme of the consumer
*Источник: составлено авторами / *Source: compiled by the authors

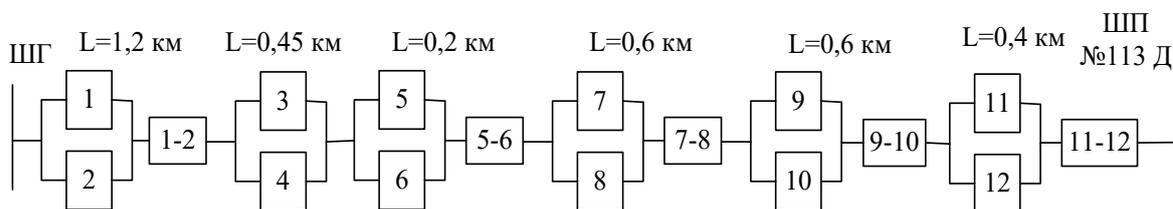


Рис. 3. Блок-схема рассматриваемого потребителя / Fig. 3. Block scheme of the consumer
*Источник: составлено авторами / *Source: compiled by the authors

Электроснабжение рассматриваемого потребителя осуществляется с помощью двухцепных ВЛ, частично двумя одноцепными ВЛ вследствие географических особенностей местности.

По результатам расчетов вероятность безотказной работы СЭС составила $P = 0,9939$. С учетом индекса технического состояния данный показатель составил $P_{ИТС} = 0,8509$. Аналогичный расчет был проведен для остальных схем. Для построения общей диаграммы вероятностей безотказной работы были рассчитаны средние значения для каждого варианта расчета (с учетом и без учета ИТС). Диаграмма представлена на рис. 4.

Существенное снижение вероятности безотказной работы происходит по причине учета значений ИТС, полученных при применении предложенной математической модели. При учете ИТС вероятность безотказной работы снижается на 8,5 %.

Критерием для принятия решения о выводе электрооборудования в ремонт может быть минимум вероятности отказа СЭС:

$$Q \rightarrow \min$$

Отказ – противоположное событие безотказной работы электрооборудования:

$$Q = 1 - P$$

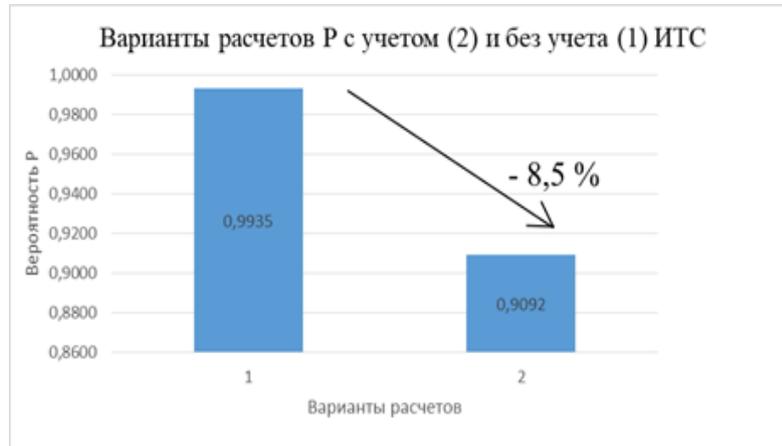


Рис. 4. Диаграмма вероятностей безотказной работы СЭС / Fig. 4. Diagram of the probability of failure-free operation of the SES

*Источник: составлено авторами / *Source: compiled by the authors

При этом учет текущего технического состояния электрооборудования влияет на принятие решения о выводе в ремонт. Например, вероятность отказа двух из всех рассмотренных схем СЭС без учета ИТС составила соответственно соответственно $Q_{113Д} = 0,007$ и $Q_{508Д} = 0,008$. При учете ИТС данные значения составили $Q_{113Д}^{ИТС} = 0,15$ и $Q_{508Д}^{ИТС} = 0,06$, т. е. были изменены неравенства:

$$Q_{113Д} < Q_{508Д}$$

$$Q_{113Д}^{ИТС} > Q_{508Д}^{ИТС}$$

Заключение / Conclusion. На сегодняшний день отсутствуют строгие математические модели, показывающие связь между развитием дефектов в деталях электрооборудования и отказом данного электрооборудования. Этот факт позволяет сделать предположение о том, что появление дефектов в электрооборудовании имеет случайный характер. С опорой на данное предположение и с помощью метода Монте-Карло была создана математическая модель, способная генерировать значения технического состояния электрооборудования.

Предложенная модель позволяет получить оценки надежности СЭС с учетом текущего технического состояния её элементов. Математическая модель основана на эвристическом методе сбора информации и реализована в виде программы для ЭВМ. Программа способна моделировать ИТС и производить автоматизированный расчет надежности сложных схем СЭС.

В ходе расчета надежности схем, рассматриваемых СЭС, были получены основные показатели надежности на основе статистической информации об отказах электрооборудования за 10 лет эксплуатации данных объектов. Суммарное значение параметра потока отказов варьируется от 0,001 до 0,01 год⁻¹ в зависимости от рассматриваемой схемы. Среднее время восстановления для всех схем составило $T_v = 1,97$ ч. На основании полученных показателей надежности были выполнены расчеты надежности для рассматриваемых схем СЭС.

С помощью разработанного программного комплекса и предложенных математических моделей был произведен расчет надежности СЭС с учетом текущего технического состояния электрооборудования. Средняя вероятность безотказной работы СЭС без учета технического состояния электрооборудования составила $P = 0,9935$. С учетом индекса технического состояния данный показатель составил соответственно $P_{ИТС} = 0,9092$. Принимая во внимание составляющую текущего технического состояния СЭС происходит снижение средней вероятности безотказной работы на 8,5 %.

На примере рассмотренных схем СЭС продемонстрировано значительное изменение вероятностей их отказа при расчетах надежности с учетом текущего технического состояния элементов. При принятии решения о выводе электрооборудования в плановый ремонт целесообразно опираться на оценки надежности с учетом технического состояния элементов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Секретарев Ю. А., Левин В. М. Выбор и принятия решений по управлению ремонтами энергооборудования в системах электроснабжения с монопотребителем // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2021. № 2(83). С. 17–25.
2. Asset Management of energy company based on risk-oriented strategy / Gitelman L. D., Kozhevnikov M. V., Chebotareva G. S., Kaimanova O. A. // Energy Production and Management in the 21st Century IV. 2020. No. 246. P. 125–135.
3. Байдюк М. А., Комарова Г. В. Оценка технического состояния и надежности электрических машин // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2019. № 3. С. 78–84.
4. Кондрашова Ю. Н., Третьяков А. М., Шалимов А. В. Составление прогнозов применительно к воздушным линиям электропередач с помощью предиктивной аналитики // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2024. № 1(100). С. 20–30.
5. Bounjimi M. E., Abdul-Nour G. Smart Asset Management in Power Industry: A Review of the Key Technologies // International Journal of Engineering Research & Technology. 2021. No. 10(10). P. 388–393.
6. Секретарев Ю. А., Горшунов А. А. Моделирование технического состояния электрооборудования систем электроснабжения объектов нефтедобывающих предприятий с различными схемами питания // Известия Транссиба. 2023. № 3(55). С. 120–130.
7. Методология управления ремонтами оборудования в электрических сетях нефтепромыслов / В. М. Левин, Н. П. Гужов, Н. А. Черненко, А. А. Яхья // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2020. № 2-3(79). С. 139–155.
8. Бешелев С. Д., Гурвич Ф. Г. Экспертные оценки. М.: Наука, 1973. 161 с.
9. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие для вузов. М.: Высшая школа, 2003. 479 с.
10. Секретарев Ю. А., Горшунов А. А. Свидетельство № RU 2022618655. Расчет надежности системы электроснабжения нефтяного промысла в рамках риск-ориентированного подхода // зарегистр. 13.05.2022. 1 с.
11. Hashemi-Dezaki H., Askarian-Abyaneh H., Haeri-Khiavi H. Reliability optimization of electrical distribution systems using internal loops to minimize energy not-supplied (ENS) // Journal of Applied Research and Technology. 2015. No. 13. P. 416–424.
12. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М.: Высшая школа, 2001. 575 с.

REFERENCES

1. Sekretarev Y, Levin V. Selection and decision-making on managing repairs of power equipment in power supply systems with monoconsumer. Newsletter of North-Caucasus Federal University. 2021;2(83):17-25. (In Russ.).
2. Gitelman LD, Kozhevnikov MV, Chebotareva GS, Kaimanova OA. Asset Management of energy company based on risk-oriented strategy. Energy Production and Management in the 21st Century IV. 2020;(246):125-135.
3. Baidyuk MA, Komarova GV. Assessment of the technical condition and reliability of electric machines. Izvestiya SPbGETU LETI. 2019;(3):78-84. (In Russ.).
4. Kondrashova YN, Tretyakov AM, Shalimov AV. Making predictions for overhead power lines applying predictive analytics. Newsletter of North-Caucasus Federal University. 2024;1(100):20-30. (In Russ.).
5. Bounjimi ME, Abdul-Nour G. Smart Asset Management in Power Industry: A Review of the Key Technologies. International Journal of Engineering Research & Technology. 2021;10(10):388-393.
6. Sekretarev YA, Gorshunov AA. Modeling of the technical condition of electrical equipment of power supply systems of oil production facilities with various power schemes. Izvestiya Transsiba. 2023;3(55):120-130. (In Russ.).
7. Levin VM, Guzhov NP, Chernenko NA, Yahya A. A. Methodology of equipment repair management in electric networks of oil fields. Nauchnyj vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2020;2-3(79):139-155. (In Russ.).

8. Beshelev SD, Gurvich FG. Expert assessments. Moscow: Nauka; 1973. 160 p.
9. Gmurman VE. Probability theory and mathematical statistics. Moscow: Vysshaya Shkola; 2003. 479 p. (In Russ.).
10. Sekretarev YA, Gorshunov AA. Certificate No. RU 2022618655. Calculation of the reliability of the oilfield power supply system within the framework of a risk-based approach. reg. 05.13.2022. 1 p. (In Russ.).
11. Hashemi-Dezaki H, Askarian-Abyaneh H, Haeri-Khiavi H. Reliability optimization of electrical distribution systems using internal loops to minimize energy not-supplied (ENS). Journal of Applied Research and Technology. 2015;(13):416-424.
12. Wentzel ES. Probability theory. Moscow: Vysshaya Shkola; 2001. 575 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Юрий Анатольевич Секретарев – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры систем электроснабжения предприятий Новосибирского государственного технического университета, Scopus ID: 53664437800, Researcher ID: A-8732-2018.

Андрей Андреевич Горшунов – аспирант кафедры систем электроснабжения предприятий Новосибирского государственного технического университета, Researcher ID: GRJ-3559-2022.

ВКЛАД АВТОРОВ

Юрий Анатольевич Секретарев. Проведение исследования – сбор, интерпретация и анализ полученных данных. Утверждение окончательного варианта – принятие ответственности за все аспекты работы, целостность всех частей статьи и ее окончательный вариант.

Андрей Андреевич Горшунов. Подготовка и редактирование текста – составление черновика рукописи и формирование его окончательного варианта, участие в научном дизайне.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yuri A. Sekretarev – Dr. Sci. (Tech.), Professor, Professor of the Department of Power Supply Systems of Enterprises, Novosibirsk State Technical University, Scopus ID: 53664437800, Researcher ID: A-8732-2018.

Andrei A. Gorshunov – Postgraduate Student of the Department of Power Supply Systems of Enterprises, Novosibirsk State Technical University, Researcher ID: GRJ-3559-2022.

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Yuri A. Sekretarev. Conducting research – data collection, analysis and interpretation.

Approval of the final manuscript – acceptance of responsibility for all types of the work, integrity of all parts of the paper and its final version.

Andrei A. Gorshunov. Text preparation and editing – drafting of the manuscript and its final version, contribution to the scientific layout.