

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА



УДК 621.31

DOI:10.30724/1998-9903-2024-26-5-31-43

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ НА ОСНОВЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ ВЫХОДА ИХ ИЗ СТРОЯ

Боярков Д.А., Компанеец Б.С.

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
г. Барнаул, Россия
dmitrij.bojarkov@gmail.com

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Современное техническое состояние электрических сетей на данный момент времени является в целом неудовлетворительным со средним уровнем физического износа около 60-70 %, поэтому разработка принципиально новых методов оценки их технического состояния на данный момент является актуальной задачей. Анализируемые в статье методики оценки технического состояния электрических сетей базируются в большей степени на субъективном и недостаточно точном методе экспертных оценок, который фактически не учитывает данные его технической диагностики, а также статистику дефектов и отказов. *ЦЕЛЬ.* Разработать методику оценки технического состояния электрических сетей, которая бы базировалась на вероятностных моделях, характеризующих физические процессы, происходящие в электрических сетях, а также данных их технической диагностики, статистики дефектов и отказов. *МЕТОДЫ.* Для оценки технического состояния электрических сетей использовался вероятностный метод оценки. При этом методика предполагает последовательное определение вероятностей проявления выделенных групп аварийных режимов, вероятность выхода из строя элемента сети в целом, а также вероятности выхода из строя объекта и группы объектов электросетевого хозяйства. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* По результатам исследований получены вероятностные модели выхода из строя электрических сетей, которые, в отличие от рассмотренных в статье методик оценки, базируются на данных технической диагностики и осмотров электрооборудования. Приведен пример реализации разработанной методики на реальных объектах электрических сетей. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Разработанная методика позволяет более обоснованно производить расстановку приоритетов технических воздействий на электросетевое оборудование, что позволит заменять или производить ремонты того оборудования, которое реально исчерпало свой физический ресурс, что снизит частоту возникновения аварийных режимов и уменьшит ущербы от перерыва электроснабжения.

Ключевые слова: электрическая сеть; техническое состояние; вероятность выхода из строя; техническая диагностика; изоляция; токоведущие элементы; аварийный режим.

Для цитирования: Боярков Д.А., Компанеец Б.С. Методика оценки технического состояния электрических сетей на основе определения вероятности выхода их из строя // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т. 26. № 5. С. 31-43. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-5-31-43.

METHODOLOGY FOR ASSESSING THE TECHNICAL CONDITION OF ELECTRICAL NETWORKS BASED ON DETERMINING THE PROBABILITY OF THEIR FAILURE

Boyarkov D.A., Kompaneets B.S.

Altai State Technical University named after I.I. Polzunov, Barnaul, Russia
dmitrij.bojarkov@gmail.com

Abstract: *RELEVANCE.* The current technical condition of electrical networks at the moment is generally unsatisfactory with an average level of physical wear of about 60-70 %, therefore,

the development of fundamentally new methods for assessing their technical condition is currently an urgent task. The methods of assessing the technical condition of electrical networks analyzed in the article are based to a greater extent on the subjective and insufficiently accurate method of expert assessments, which actually does not take into account the data of its technical diagnostics, as well as statistics of defects and failures. **OBJECT.** To develop a methodology for assessing the technical condition of electrical networks, which would be based on probabilistic models characterizing the physical processes occurring in electrical networks, as well as data from their technical diagnostics, statistics of defects and failures. **METHODS.** To assess the technical condition of electrical networks, a probabilistic assessment method was used. In this case, the methodology involves sequential determination of the probabilities of occurrence of selected groups of emergency modes, the probability of failure of a network element as a whole, as well as the probability of failure of an object and a group of objects of the power grid. **RESULTS.** Based on the research results, probabilistic models of failure of electrical networks were obtained, which, unlike the assessment methods discussed in the article, are based on data from technical diagnostics and inspections of electrical equipment. An example of the implementation of the developed methodology on real electrical network objects is given. **CONCLUSION.** The developed methodology allows for a more reasonable prioritization of technical impacts on electrical grid equipment, which will make it possible to replace or repair equipment that has actually exhausted its physical resource, which will reduce the frequency of emergency conditions and reduce damage from power supply interruptions.

Keywords: electric network; technical condition; probability of failure; technical diagnostics; insulation; current-carrying elements; emergency mode.

For citation: Boyarkov D.A., Kompaneets B.S. Methodology for assessing the technical condition of electrical networks based on determining the probability of their failure. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26 (5): 31-43. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-5-31-43.

Введение и литературный обзор (Introduction and Literature Review)

Электросетевой комплекс России до проведения реформ, переводящих отрасль на рыночные механизмы хозяйствования (2002-2008 годы), отличался хорошей устойчивостью и прогнозируемым, достаточно высоким уровнем надежности. Разделение электроэнергетики на множество отдельных субъектов рынка привело к существенному уменьшению инвестиций в отрасль, что, в свою очередь, способствовало к стремительному устареванию электросетевого оборудования. Обновление электросетевой инфраструктуры стало осуществляться по остаточному принципу [1, 2]. В результате обычным явлением стали веерные отключения потребителей, а также в стране стали происходить крупные системные аварии, в том числе с человеческими жертвами [3, 4].

На данный момент времени в среднем около 60-70 % электрических сетей в России выработали свой физический и моральный ресурс [5]. Так, например, для крупнейшей электросетевой компании сибирского региона – ПАО «Россети Сибирь», износ электросетевого оборудования на конец 2023 года в разрезе его типов выглядит следующим образом [6]:

- Трансформаторное оборудование: 66 %;
- Коммутационные аппараты: 81 %;
- ВЛ-0,4-20 кВ: 80 %;
- ВЛ-35-220 кВ: 87 %;
- КЛ-0,4-20 кВ: 62 %;
- КЛ-35-110 кВ: 31 %.

Как видно из приведенной информации, в целом данная тенденция с износом электрооборудования для данной электросетевой компании сопоставима с общероссийской. Также отметим, что особенно остро стоит проблема с высоким износом электрических сетей в сельской местности [5, 6].

Для минимизации последствий действия сложившейся негативной ситуации в отрасли электросетевые организации должны постоянно контролировать надежность и своевременно проводить обновление элементов электрических сетей [7]. Однако обновить единовременно всё объективно нуждающееся в этом электрооборудование

невозможно вследствие ограниченности экономических ресурсов, формирующихся из тарифа на электроэнергию. Согласно стратегии развития электросетевого комплекса РФ до 2030 года, электроэнергетические организации, в условиях ограниченных финансовых ресурсов, для сокращения случаев аварийных отключений и минимизации их последствий должны идентифицировать электрооборудование, находящееся в наиболее неудовлетворительном состоянии [8, 9].

Для определения технического состояния электрических сетей ранее были разработаны специальные методики и автоматизированные системы, приведем некоторые из них. Рассмотрим отечественные разработки:

- Экспертная система оценки состояния электрооборудования «Диагностика+» [10];
- Автоматизированная система принятия решений для оценки фактического состояния электрооборудования [11];
- Методология принятия решений при оценке технического состояния силовых трансформаторов и автотрансформаторов электрических сетей с учётом фактора риска повреждения [12];
- Система нечеткого вывода для оценки состояния изоляции кабельных линий [13];
- Автоматизированная система контроля технического состояния основного оборудования магистральных электрических сетей [14];
- Интеллектуальная система оценки технического состояния трансформаторной подстанции 35/6 (10) кВ [15];
- Методология управления ремонтами оборудования в электрических сетях нефтепромыслов [16].

Анализируя приведенные методики и системы, можно прийти к выводу, что в их основу положен в большей степени экспертный метод оценки. Такой подход к оценке технического состояния электрических сетей базируется на мнении экспертов в области эксплуатации электросетевых объектов о реальном состоянии оборудования [7]. Однако, согласно исследованию [17], при широком внедрении такой методики проводящий оценку персонал имеет различную квалификацию и опыт работы в отрасли, при этом итоговая оценка технического состояния электрических сетей, очевидно, будет очень субъективной и недостаточно точной. Соответственно, проводить приоритизацию, опираясь только на метод экспертных оценок при определении технического состояния электрических сетей, будет крайне проблематично.

Также существуют зарубежные методики и системы по оценке технического состояния электрических сетей [18-26]. Однако их внедрение в российскую практику оценки технического состояния электрических сетей будет не совсем корректно, поскольку зарубежные и отечественные правила и нормы эксплуатации, технической диагностики и испытаний электрооборудования значительно различаются [27]. Кроме того, применение зарубежных автоматизированных систем по оценке технического состояния электрических сетей в российских электросетевых компаниях в настоящий момент практически невозможно вследствие санкционных ограничений.

Главный контролирующий электроэнергетическую отрасль орган государственной власти в России – Министерство энергетики РФ, изъявила свою заинтересованность и поддержку данной тематике. В связи с этим, данное ведомство изучило ситуацию, сложившуюся в оценке технического состояния электросетевого оборудования и обозначила несколько обобщенных замечаний к существующим методикам и системам (так называемым системам управления производственными активами в электроэнергетике), которые можно рассматривать как руководство к дальнейшей научной деятельности [27]:

- отсутствует единая методология определения технического состояния отдельных видов оборудования и объектов электросетевого хозяйства в целом исходя из реальных данных об электрооборудовании и интенсивности его эксплуатации;
- отсутствует системная оценка состояния электрооборудования на основе данных его технической диагностики, статистики дефектов и отказов.

Таким образом, разработка принципиальной новой методики оценки технического состояния электрических сетей, которая бы удовлетворяла требованиям, предъявляемым к ней Минэнерго РФ, является актуальной научно-практической задачей.

На основании изложенного, можно заключить, что цель исследования заключается в разработке методики оценки технического состояния электрических сетей, которая бы базировалась на вероятностных моделях, характеризующих физические процессы, происходящие в электрических сетях, а также данных их технической диагностики, статистики дефектов и отказов.

Научная значимость исследования состоит в разработке принципиально новой методики оценки технического состояния электрических сетей, отличающаяся от существующих тем, что относительный ресурс электрооборудования представлен в виде изменения сопротивления изоляции и токоведущих частей, а также наличием поправочных коэффициентов A , отражающих статистику дефектов и параметров потока отказов для каждого вида электрооборудования.

Практическая значимость исследования заключается в том, что разработанная методика оценки технического состояния электрических сетей позволяет электросетевым компаниям наиболее оптимально с технико-экономической точки зрения производить технические воздействия на электрические сети.

Материалы и методы (Materials and methods)

Для наиболее объективной оценки технического состояния электросетевого оборудования необходимо четко представлять и уметь математически описывать физические процессы, которые происходят в электроустановках при протекании в них электрического тока. Применяя «жесткий» детерминистический подход можно составить некоторую обобщенную математическую модель, которая будет представлять из себя достаточно громоздкие и сложно разрешаемые дифференциальные уравнения. Однако в реальных условиях эксплуатации электрических сетей данный метод практически никак не учитывает различного рода неопределенности [28]. Это связано с объективной невозможностью учесть все факторы, которые влияют на реальное техническое состояние электроустановки, например, постоянно меняющиеся условия среды эксплуатации. В связи с этим, для упрощения расчетов и учета неопределенности исходной информации, целесообразно перейти от детерминированной к вероятностной модели технического состояния электрических сетей. В качестве математического описания такой модели предлагается использовать вероятность выхода из строя электросетевого оборудования [29].

Возникновение аварийных режимов в электрических сетях может происходить по самым разным причинам, поэтому обобщенно функцию вероятности выхода из строя можно представить в следующем виде [30]:

$$P = f(S, M, P, B, I \dots), \quad (1)$$

где S – воздействие неблагоприятных условий внешней среды (атмосферные перенапряжения, осадки, гололед, сильный ветер, резкие перепады температур); M – механические повреждения (взаимодействие с птицами и животными, наезд транспортных средств, повреждения силового кабеля при проведении земельных работ и т. д.); P – ошибочные действия либо халатное бездействие персонала, обслуживающего электрические сети; B – заводские дефекты и брак электрооборудования; I – старение и износ электрооборудования.

А также другие факторы, влияние которых на электрические сети не столь велико, но они имеют место быть.

Как известно, электросетевые организации с целью идентификации технического состояния электрооборудования обязаны производить контрольные аппаратные измерения некоторых показателей, характерных для рассматриваемого вида электроустановок (согласно Правилам устройства электроустановок). Данные измеряемые параметры определяются периодически и как раз учитывают все факторы, действующие на электроустановку, в том числе с помощью этих параметров можно определить качество производимого технического обслуживания электроустановки в период между регламентируемыми измерениями (действие человеческого фактора), скорость действия негативных факторов окружающей среды на электрооборудование и т. д. [31] Так, например, для изоляции электроустановки таким параметром является сопротивление изоляции $R_{из}$, а для токоведущих частей – сопротивление контактного соединения постоянному току $R_{конт}$. В связи с этим, построение математических моделей вероятностей выхода из строя электрических сетей будет производиться на основе именно этих измеряемых величин, что, в свою очередь, не потребует дополнительных затрат на создание новых подходов к технической диагностике электросетевого оборудования, что является экономически выгодным [32].

Кроме того, внешние механические повреждения, возникающие в процессе эксплуатации электроустановки и приводящие к ее постепенному выходу из строя, объединяет группу причин, не снижающих изоляционные и токоведущие свойства электроустановок в данный момент времени, но способных привести к более ускоренному ухудшению данных характеристик, и поэтому требующие отдельного внимания [32]. Данные дефекты также накапливаются со временем и приводят к выходу

электроустановки из строя.

Учитывая вышеизложенное, для целей данной методики выделяются три укрупненных группы аварийных режимов электросетевого оборудования (рис. 1).



Рис. 1. Укрупненные группы аварийных режимов в электрических сетях с характерными причинами отказов

Fig. 1. Enlarged groups of emergency modes in electrical networks with typical causes of failures

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Результаты (Results)

Рассматриваемая методика была разработана для основного электросетевого оборудования, выход из строя которого непосредственно приводит к перерыву электроснабжения потребителей, а именно: силовые трансформаторы, силовые выключатели (вакуумные, масляные, воздушные), разъединители, отделители и короткозамыкатели, а также воздушные и кабельные линии электропередачи. В качестве примера проведем оценку технического состояния для разъединителей. Для этих целей были разработаны математические модели вероятностей выхода из строя вследствие разрыва токоведущих элементов, пробоя изоляции, а также вследствие механических повреждений.

Вероятность разрыва токоведущих частей определяется по формуле:

$$P_{\text{конт}} = \frac{1}{\frac{R_{\text{конт.изм.}}}{R_{\text{конт.норм}}} \sqrt{e^{A_{\text{конт}}}}}, \quad (2)$$

где $R_{\text{конт.изм.}}$ – измеренное значение сопротивления контакта постоянному току;

$R_{\text{конт.норм}}$ – нормируемое (максимально допустимое) технической документацией значение сопротивления контакта постоянному току;

$$A_{\text{конт}} = \ln \left(\frac{1}{1 - \Omega_{\text{конт}}} \right) \cdot \frac{R_{\text{конт.изм.}}}{R_{\text{конт.норм}}} = 2,9414 - \text{поправочный коэффициент, учитывающий}$$

статистическую информацию по выходу из строя разъединителей вследствие разрыва токоведущих элементов;

$\Omega_{\text{конт.}} = \omega_{\text{раз}} \cdot \alpha_{\text{конт.раз}}$ – параметр потока отказов вследствие разрыва токоведущих элементов разъединителя;

$\omega_{\text{раз}} = 0,01$ – параметр потока отказов разъединителя (справочная величина)¹;

$\alpha_{\text{конт.раз}} = 0,4286$ – доля разъединителей, вышедших из строя вследствие разрыва токоведущих элементов.

Отметим, что значение $\alpha_{\text{конт.раз}}$ было получено в результате обработки статистической информации по вышедшим из строя более чем 3500 разъединителям (самых разнообразных марок и технических характеристик) за последние 5 лет в одной

¹ Указания по применению показателей надежности элементов энергосистем и работы энергоблоков с паротурбинными установками. – Москва: СПО Союзтехэнерго, 1985. – 18 с.

из крупнейших электросетевых компаний страны – ПАО «Россети Сибирь».

Вероятность пробоя изоляции:

$$P_{из} = 1 - \frac{1}{\frac{R_{из.изм}}{R_{из.норм}} \sqrt{e^{A_{из}}}}, \quad (3)$$

где $R_{из.изм}$ – измеренное значение сопротивления изоляции;

$R_{из.норм}$ – нормируемое (максимально допустимое) технической документацией значение сопротивления изоляции;

$$A_{из} = \ln\left(\frac{1}{1-\Omega_{из}}\right) \cdot \frac{R_{из.изм}}{R_{из.норм}} = 0,04846 - \text{поправочный коэффициент, учитывающий}$$

статистику дефектов разъединителя при пробое изоляции;

$\Omega_{из} = \omega_{раз} \cdot \alpha_{из.раз}$ – параметр потока отказов вследствие пробоя изоляции разъединителя;

$\omega_{раз} = 0,01$ – параметр потока отказов разъединителя (справочная величина);

$\alpha_{из.раз} = 0,3853$ – доля разъединителей, вышедших из строя вследствие пробоя изоляции.

Данный параметр получен аналогично параметру $\alpha_{конт.раз}$.

Далее рассмотрим механизм определения вероятности выхода из строя вследствие механических повреждений, к которым относятся трещины, сколы, вмятины, выкрашивания, оплавления и т.д. Данный вид повреждений (его объем и глубина) хоть и косвенно, но указывает на то или иное состояние электрооборудования, что, в конечном счете, может привести к аварии. Вероятностные модели выхода из строя в данном случае будет невозможно формализовать в виде какой-либо измеряемой физической величины (сопротивления, тока, напряжения и т. д.), поэтому в данном случае будет уместно их оценить и формализовать с помощью метода экспертных оценок [28, 29].

В условиях эксплуатации электрических сетей нашей страны в качестве экспертов чаще всего выступает эксплуатационный персонал, который может иметь самое различное образование, опыт работы и квалификацию. Поэтому он может оценивать техническое состояние электросетевого оборудования не объективно и даже противоречиво. Для ухода от данной ситуации, оценку внешне идентифицируемых повреждений целесообразно проводить по «жесткой» шкале экспертных оценок, когда сотрудник из числа эксплуатационного персонала четко сличает то или иное повреждение с разработанным описанием дефекта и проставляет соответствующую увиденному балльную оценку [29]. Заметим, что в условиях цифровизации электросетевого комплекса будет очень полезно выполнять фотофиксацию оцененного оборудования в целях дальнейшей выборочной проверки качества оценки и возможности ретроспективного анализа внешнего состояния оборудования.

Разработанная экспертная шкала имеет градацию от «1» до «10», где под «1» понимается наихудшее внешнее состояние оборудования, а под «10» понимается наилучшее внешнее состояние оборудования. Кроме того, данная экспертная шкала имеет и качественную оценку состояния:

– «Хорошее» (от 7 до 10 баллов): состояние оборудования практически не представляет угрозу выхода его из строя (в нормальных условиях эксплуатации);

– «Удовлетворительное» (от 3 до 6 баллов): состояние оборудования уже представляет определенный риск выхода его из строя;

– «Неудовлетворительное состояние» (от 1 до 2 баллов): состояние, которое вызывает наибольшее описание выхода его из строя, поэтому для него необходимо производит определенные управляющие технические воздействия (вывод из эксплуатации и замена на новое, ремонт, техническое перевооружение и реконструкция и т. д.).

Для разъединителя механические повреждения можно разбить на две системных составляющие: наличие внешних дефектов конструкции, а также наличие дефектов работы механизмов (ножей). Вероятность выхода из строя разъединителя при наличии внешних дефектов определится следующим образом:

$$P_{деф} = \frac{\sqrt[10]{10,3 - \sqrt[10]{B_{деф}}}}{\sqrt[10]{10,3}}, \quad (4)$$

где $B_{деф}$ – экспертная оценка разъединителя на наличие внешних дефектов по шкале от 1 до 10 баллов.

При этом сама экспертная шкала оценок приведена в таблице 1.

Таблица 1
Table 1Экспертная шкала оценки внешних дефектов разъединителя
Expert scale for evaluation of external defects of disconnecter

Качественная шкала оценки элемента электрической сети	Качественное описание оценки элемента электрической сети
10 «хорошее»	1) Крепление разъединителя плотное и надежное, без изменения его положения от исходного; 2) Поверхность изоляторов чистая и ровная, не имеет дефектов (сколы, трещины); 3) В местах соединения токоведущих элементов отсутствуют следы коррозии, деформации, подвижность; 4) Прочие элементы не имеют видимых дефектов: сколов, трещин, деформаций, следов коррозии.
6 «удовлетворительное»	1) Крепление разъединителя плотное, возможно незначительное изменение положения от исходного в следствии механической нагрузки; 2) Поверхность изоляторов имеет незначительные сколы, трещины, изменение окраски части поверхности (хотя бы один признак); 3) В местах соединения токоведущих элементов наблюдаются следы коррозии, но отсутствуют другие дефекты; 4) Прочие элементы имеют незначительные сколы, трещины, деформации, следы коррозии (хотя бы один признак).
2 «неудовлетворительное»	1) Крепление разъединителя слабое, корпус подвижен; 2) Поверхность изоляторов имеет значительные сколы, трещины, наблюдаются следы действия электрической дуги (хотя бы один признак); 3) В местах соединения токоведущих элементов наблюдаются почернения, существенные деформации, в соединениях имеется подвижность (хотя бы один признак); 4) Прочие элементы имеют значительные сколы, трещины, деформации, следы коррозии (хотя бы один признак).

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Вероятность выхода из строя ножей разъединителя определится по формуле:

$$P_{\text{нож}} = \frac{\sqrt[10]{10,3} - \sqrt[10]{B_{\text{нож}}}}{\sqrt[10]{10,3}}, \quad (5)$$

где $B_{\text{нож}}$ – экспертная оценка разъединителя на наличие дефектов ножей по шкале от 1 до 10 баллов.

Экспертная шкала оценок приведена в таблице 2.

Поскольку разъединитель выйдет из строя при предельном проявлении хотя бы одного из механических дефектов, то общая вероятность аварии определится по формуле:

$$P_{\text{мех}} = A_{\text{мех}} \cdot [1 - (1 - (1 - P_{\text{оэф}}) \cdot (1 - P_{\text{нож}}))], \quad (6)$$

где $A_{\text{мех}} = 0,1861$ – поправочный коэффициент, учитывающий статистику дефектов разъединителя при возникновении механических повреждений.Таблица 2
Table 2Экспертная шкала оценки дефектов ножей разъединителя
Expert scale for evaluation of disconnecter blades defects

Качественная шкала оценки элемента электрической сети	Качественное описание оценки элемента электрической сети
10 «хорошее»	1) Во всех испытаниях амплитуда движения контактов одинаковая; 2) Соприкосновение поверхностей контактов полное и плотное; 3) Все элементы обладают чистой и ровной поверхностью без дефектов, деформаций и изменения цвета; 4) Нож движется полностью параллельно зажимам.
6 «удовлетворительное»	1) В одном или двух испытаниях движение контактов неполное; 2) Соприкосновение поверхностей контактов стало менее полным, сила прижатия элементов снизилась; 3) На поверхности ножа наблюдаются незначительные неровности, нож незначительно искривлен, возможно изменение цвета контакта (хотя бы один признак); 4) Нож движется незначительно непараллельно зажимам.
2	1) В трех и более испытаниях движение контактов неполное;

«неудовлетворительное»	2) Хотя бы в одном испытании контакты не сжались или всегда имеют очень малую поверхность соприкосновения и силу сжатия; 3) На поверхности наблюдаются существенные неровности, присутствуют раковины от электрической дуги и/или трещины, следы плавления, поверхность ножа сильно искривлена (хотя бы один признак); 4) Нож движется значительно непараллельно зажимам.
------------------------	---

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Вероятность выхода из строя разъединителя в целом определяется на основании теории надежности технических систем как для элементов электрической цепи, соединенных последовательно:

$$P_{раз} = 1 - (1 - P_{из}) \cdot (1 - P_{конт}) \cdot (1 - P_{мех}). \tag{7}$$

По получившемуся значению вероятности выхода из строя достаточно сложно определить реальное техническое состояние электроустановки. Поэтому важно знать соотношение величины вероятности, получившейся в результате расчетов, и качественного состояния элемента, по которому уже можно делать вывод о степени его изношенности. Для разъединителя такое соотношение было получено и приведено в таблице 3.

Таблица 3

Table 3

Соотношение величины вероятности выхода из строя и качественной шкалы состояния разъединителя

Ratio of the probability of failure and failure and the qualitative scale of the disconnector state

хорошо	удовлетворительно	неудовлетворительно
менее 0,012	от 0,012 до 0,072	0,072 и более

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Аналогично элементу электрической сети, определяется вероятность выхода из строя объекта электросетевого хозяйства. Под объектом электросетевого хозяйства понимается совокупность оборудования, находящегося на подстанции, и соединенного друг с другом по определенным правилам электротехники, либо линии электропередачи (кабельные и/или воздушные), отходящие от подстанции, и пролегающие непосредственно до потребителя. Говоря об оборудовании подстанций следует заметить, что оно может соединяться между собой по самым разнообразным и порой очень сложным схемам. В качестве наглядного примера рассмотрим одну из простейших схем соединения элементов на подстанции (рис. 2).

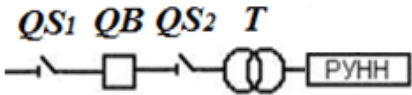


Рис. 2. Схема электрических соединений объекта электросетевого хозяйства

Fig. 2. Electrical connection diagram of power grid facility

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для такого объекта электросетевого хозяйства вероятность выхода из строя определится следующим образом:

$$P = 1 - [1 - P_{QS1}] \cdot [1 - P_{QB}] \cdot [1 - P_{QS2}] \cdot [1 - P_T]. \tag{8}$$

Обсуждение (Discussions)

В качестве примера реализации разработанной методики рассмотрим два объекта электросетевого хозяйства, расположенных в селе Кулунда Алтайского края: это оборудование двух подстанций КТП-18 и КТП-497, и отходящих от них воздушных линий электропередачи напряжением 0,4 кВ. Определим для каждого элемента сети значения вероятностей выхода из строя (табл. 4).

Проанализировав полученные показатели вероятностей выхода из строя можно заключить, что приоритет технических воздействий необходимо отдать тому электрооборудованию, которое имеет наибольшие значения вероятностей выхода из строя. Из силовых трансформаторов для технического воздействия необходимо выбрать трансформатор КТП-18, из разъединителей – разъединитель № 1 КТП-18, из линий электропередачи – ВЛ-0,4 кВ от КТП-18, для объекта электросетевого хозяйства – КТП-18 в целом, а для группы объектов электросетевого хозяйства – КТП-18 – ВЛ-0,4 кВ.

Пример реализации разработанной методики оценки вероятностей выхода из строя электрических сетей

Example of implementation of the developed methodology for assessing the probability of failure of electrical networks

Элемент сети	Исходные данные			Р (расчетная величина)	Приоритет воздействия
	$R_{из}$, МОм	$R_{конт}$, мкОм	$B_{мех}$		
Трансформатор КТП-18	779	2,212	«5»	0,01298	✓
Трансформатор КТП-497	2930	3,872	«8»	0,00369	
Разъединитель № 1 КТП-18	4400	120	«6»	0,02631	✓
Разъединитель № 2 КТП-18	4350	115	«5»	0,02413	
Разъединитель № 1 КТП-497	13600	107	«8»	0,01225	
Разъединитель № 2 КТП-497	12700	112	«7»	0,0148	
ВЛ-0,4 кВ от КТП-18	–	–	«5»	0,3927	✓
ВЛ-0,4 кВ от КТП-497	–	–	«7»	0,1587	
КТП-18	–	–	–	0,06215	✓
КТП-497	–	–	–	0,0305	
КТП-18 – ВЛ-0,4 кВ	–	–	–	0,4305	✓
КТП-497 – ВЛ-0,4 кВ	–	–	–	0,1843	

**Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.*

Заключение (Conclusions)

По результатам исследований были разработаны вероятностные модели выхода из строя электрических сетей, которые характеризуют их определенное техническое состояние. Данные модели полностью учитывают замечания, предъявляемые к ним Министерством энергетики России, а именно вероятностные модели построены исходя из реальных данных об электрооборудовании и интенсивности его эксплуатации, а также оценка технического состояния производится на основе данных его технической диагностики, статистики дефектов и отказов. Данная концепция была реализована в приведенной работе при разделении возможных аварийных режимов электроустановок на пробой изоляции и разрыв токоведущих частей, диагностические параметры которых периодически аппаратно измеряются. Но, в тоже время, при получении вероятностных моделей выхода из строя вследствие механических повреждений, более целесообразно использовать метод экспертных оценок.

Таким образом, в данной статье показано, что с помощью разработанной методики возможно обоснованно производить расстановку приоритетов технических воздействий на электросетевое оборудование. Это позволит заменять или производить ремонты того оборудования, которое реально исчерпало свой физический ресурс, что снизит частоту возникновения аварийных режимов и уменьшит материальные ущербы как потребителям электроэнергии, так и электросетевым компаниям.

Литература

1. Яценко, А. В. Организация поставок электроэнергии и мощности: опыт и практика реформ отдельного региона / А. В. Яценко // Менеджмент и бизнес-администрирование. – 2021. – № 3. – С. 92-103.
2. Веселов, Ф. В. Условия развития электроэнергетики России в рамках жестких ценовых ограничений в среднесрочной перспективе / Ф. В. Веселов, А. И. Соляник // Проблемы прогнозирования. – 2020. – № 1(178). – С. 88-98.
3. Воропай, Н. И. Интегрированные энергетические системы: вызовы, тенденции, идеология / Н. И. Воропай, В. А. Стенников, Е. А. Барахтенко // Проблемы прогнозирования. – 2017. – № 5(164). – С. 39-49.
4. Яценко, А. В. Экономико-финансовая оценка целесообразности проведения мероприятий по предотвращению аварийных ситуаций в электроэнергетике / А. В. Яценко, И. М. Казымов, Б. С. Компанеев // Финансовый бизнес. – 2022. – № 2(224). – С. 165-169.
5. Оценка уровня надежности функционирования филиалов ПАО Россети России / И. В. Наумов, С. В. Подъячих, М. Н. Полковская [и др.] // Надежность. – 2024. – Т. 24, № 2. – С. 38-51.
6. ПАО «Россети Сибирь»: официальный сайт компании [Электронный ресурс] // Годовой отчет за 2023 год : URL : <https://www.rosseti-sib.ru/about/dokumenty-about/godovye-otchety/> (дата обращения 25.06.2024).

7. Боярков, Д. А. Алгоритм риск-ориентированного управления техническим состоянием электрических сетей / Д. А. Боярков, А. В. Яценко // Автоматизация в промышленности. – 2022. – № 1. – С. 56-60.
8. Голубев, П. В. Без обновления сети дальше существовать не могут / П. В. Голубев // Энергоэксперт. – 2011. – № 1 (24). – С. 12–16.
9. Грабчак, Е. П. Проблемы замены изношенного оборудования в электроэнергетике России: приоритеты модернизации в контексте обеспечения надежности и безопасности / Е. П. Грабчак, Е. Л. Логинов, Ю. А. Романова // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2019. – № 5. – С. 38-43.
10. Попов, Г. В. Экспертная система оценки состояния электрооборудования «Диагностика+» / Г. В. Попов, Е. Б. Игнатьев, Л. В. Виноградова, Ю. Ю. Рогожников, Д. А. Ворошина // Электрические станции. – 2011. – № 5. – С. 36-45.
11. Хальясмаа, А. И. Автоматизированная система принятия решений для оценки фактического состояния электрооборудования / А. И. Хальясмаа, С. А. Дмитриев, С. Е. Кокин // Сборник трудов V международная молодёжная научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодежи» – 2014». – 2014. – С. 187-193.
12. Майоров, А. В. Методология принятия решений при оценке технического состояния силовых трансформаторов и автотрансформаторов электрических сетей с учётом фактора риска повреждения / А. В. Майоров, Ю. Н. Львов // Электрические станции. – 2019. – №. 9. – С. 14-20.
13. Бирюлин, В. И. Применение системы нечеткого вывода для оценки состояния изоляции кабельных линий / В. И. Бирюлин, Д. В. Куделина, А. Н. Горлов // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2021. – Т. 13. – №. 1 (49). – С. 191-203.
14. Смекалов В. В., Автоматизированная система контроля технического состояния основного оборудования магистральных электрических сетей / В. В. Смекалов, И. А. Назаров, А. С. Мерзляков, К. К. Романов // ЭНЕРГИЯ. – 2022. – №. 1. – С. 32-41.
15. Ившин И. В. Интеллектуальная система оценки технического состояния трансформаторной подстанции 35/6 (10) кВ / И. В. Ившин, А. Р. Галяутдинова, О. В. Владимиров, М. Ф. Низамиев, Е. Н. Карпов, Э. П. Мельник // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. – 2022. – Т. 24. – №. 2. – С. 24-35.
16. Левин В. М. Методология управления ремонтами оборудования в электрических сетях нефтепромыслов / В. М. Левин, Н. П. Гужов, Н. А. Черненко, А. А. Яхья // Системы анализа и обработки данных. – 2020. – №. 2-3 (79). – С. 139-155.
17. Bao, Y. Impact of human error on electrical equipment preventive maintenance policy / Y. Bao, Y. Wang, G. Huang, J. Xia, J. Chen, C. Guo // 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting. – IEEE, 2015. – P. 1-5.
18. Farzin, N. Transformer Practical Turn-to-Turn Fault Detection Performance using Negative Sequence and Space Vector-Based Methods / N. Farzin, M. Vakilian, E. Hajipour // Proceedings of the International Conference on Protection and Automation of Power System (IPAPS). – 2019. – P. 1-6. doi: 10.1109/IPAPS.2019.8641951.
19. Dahiya, R. Review on Condition Monitoring and Maintenance of Electrical Equipment in Power Systems / R. Dahiya, A. Singh // A International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2020. – Vol. 119, 105848.
20. Li, P. An Overview of Condition-Based Maintenance for Power Systems / P. Li, C. Wang, L. Jiang // Energies. – 2022. – Vol. 15(9). – P. 2430.
21. Da Silva, A. M. L. Integrated reliability evaluation of generation, transmission and distribution systems / A. M. L. Da Silva, A. M. Cassula, R. Billinton, L. A. F. Manso // IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution, Vol. 149, Issue 1, January 2002, P. 1-6.
22. Shpiganovich, A. N. Power-supply systems reliability control / A. N. Shpiganovich, V. I. Zatsepina, A. A. Shpiganovich, V. M. Stepanov // EAI Endorsed Transactions on Energy, Web Vol. 18, Issue 19, 2018, e10.
23. Emecheta S. N. Monitoring and Evaluation of The Reliability of Distribution Network with Distributed Generation / S. N. Emecheta, R. O. Nwajuonye, G. C. Okonkwo // Journal of Engineering Research and Reports. – 2021. – Vol. 12. – P. 29-42.
24. Rivas A. E. L. Faults in smart grid systems: Monitoring, detection and classification / A. E. L. Rivas, T. Abrao // Electric Power Systems Research. – 2020. – P. 106602.
25. Leal A. Reliability provision in software defined power substations communication networks

/ A. Leal, M. Durán, J. F. Botero // Computer Networks. – 2020. – P. 107560.

26. Ghiasi M., Ghadimi N., Ahmadiania E. An analytical methodology for reliability assessment and failure analysis in distributed power system / M. Ghiasi, N. Ghadimi, E. Ahmadiania // SN Applied Sciences. – 2019. – Vol. 1. – P. 44.

27. Грабчак, Е. П. Оценка технического состояния энергетического оборудования в условиях цифровой экономики. // Надежность и безопасность энергетики. – 2017. – №4 (10). – С. 2-16.

28. Калинин, А. Ф. Модель прогнозирования риска безопасности и оценки остаточного ресурса элементов электроустановки / А. Ф. Калинин, Т. В. Еремина // Мичуринский агрономический вестник. – 2018. – № 1. – С. 73-79.

29. Хлебцов, А. П. Анализ состояния износа электрооборудования подстанций и методы диагностирования аварийных режимов / А. П. Хлебцов, Л. Х. Зайнутдинова // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – 2019. – № 2(27). – С. 17-20.

30. Антоненко, И. Н. Риск-ориентированный подход к управлению производственными активами энергетики / И. Н. Антоненко // Энергоэксперт. – 2020. – № 1(73). – С. 26-33.

31. Сошников, А. А. Количественные показатели в технологиях безопасности / А. А. Сошников, Б. С. Компанеец // Ползуновский вестник. – 2014. – № 4. – С. 119-123.

32. Kompaneets, B. S. Electric grids technical evaluation method based on their failure probability / B. S. Kompaneets, D. A. Boyarkov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : 4th International Scientific and Technical Conference on Energy Systems, ICES 2019, Belgorod, 31 октября – 01 2019 года. Vol. 791. – Belgorod: Institute of Physics Publishing, 2020. – P. 012030.

Авторы публикации

Боярков Дмитрий Андреевич – соискатель при кафедре «Электрификация производства и быта» Алтайского государственного технического университета им. И. И. Ползунова, г. Барнаул, Россия. dmitrij.bojarkov@gmail.com.

Компанеец Борис Сергеевич – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Электрификация производства и быта» Алтайского государственного технического университета им. И. И. Ползунова, г. Барнаул, Россия.

References

1. Jashhenko AV. Organizacija postavok jelektroenergii i moshhnosti: opyt i praktika reform ot del'nogo regiona. *Menedzhment i biznes-administririvanie*. 2021; 3:92-103. (In Russ). doi: 10.33983/2075-1826-2021-3-92-103.

2. Veselov FV, Soljanik AI. Uslovia razvitiya jelektroenergetiki Rossii v ramkah zhestkih cenovyh ograničenij v srednesročnoj perspective. *Problemy prognozirovaniya*. 2020; 1(178):88-98. (In Russ).

3. Voropaj NI, Stennikov VA, Barahtenko EA. Integrirovannye jenergeticheskie sistemy: vyzovy, tendencii, ideologija. *Problemy prognozirovaniya*. 2017; 5(164):39-49. (In Russ).

4. Jashhenko AV, Kazymov IM, Kompaneec BS. Jekonomiko-finansovaja ocenka celesoobraznosti provedeniya meroprijatij po predotvrashheniju avarijnyh situacij v jelektroenergetike. *Finansovyy biznes*. 2022; 2(224):165-159. (In Russ).

5. Naumov IV, Podjachih SV, Polkovskaja MN et al. Ocenka urovnja nadezhnosti funkcionirovaniya filialov PAO Rosseti Rossii. *Nadezhnost*. 2024; 24(2):38-51. (In Russ).

6. PAO «Rosseti Sibir»: oficial'nyj sajt kompanii. *Godovoj otchet za 2023 god*. Available at: <https://www.rosseti-sib.ru/about/dokumenty-about/godovye-otchety/>. Accessed: 25 Jun 2024. (In Russ).

7. Bojarkov DA, Jashhenko AV. Algoritm risk-orientirovannogo upravleniya tehničeskimi sostojanijem jelektricheskikh setej. *Avtomatizacija v promyshlennosti*. 2022; 1:56-60. (In Russ). doi: 10.25728/avtprom.2022.01.12.

8. Golubev PV. Bez obnovlenija seti dal'she sushhestvovat' ne mogut. *Engergoexpert*. 2021; 1(24):12-16. (In Russ).

9. Grabchak EP, Loginov EL, Romanova JuA. Problemy zameny iznoshennogo oborudovaniya v jelektroenergetike Rossii: priority modernizacii v kontekste obespečenija nadezhnosti i bezopasnosti.

Problemy bezopasnosti i chrezvychajnyh situacij. 2019; 5:38-43. (In Russ). dio: 10.36535/0869-4176-2019-05-5.

10. Popov GV, Ignat'ev EB, Vinogradova LV, et al. Jekspertnaja sistema ocenki sostojanija jelektrooborudovanija «Djagnostika+». *Jelektricheskie stancii*. 2011; 5:35-45. (In Russ).

11. Hal'jasmaa AI, Dmitriev SA, Kokin SE. Automated decision-making system to assess the actual condition of electrical equipment. *Sbornik trudov V mezhdunarodnaja molodjozhnaja nauchno-tehnicheskaja konferencija "Jelektrojenergetika glazami molodezhi"*. 2014. pp. 187-193. (In Russ.).

12. Majorov AV, L'vov JuN. Metodologija prinjatija reshenij pri ocenke tehničeskogo sostojanija silovyh transformatorov i avtotransformatorov jelektricheskijh setej s uchjotom faktora riska povrezhdenija. *Jelektricheskie stancii*. 2019; 9:14-20. (In Russ.).

13. Birjulin VI, Kudelina DV, Gorlov AN. Primenenie sistemy nechetkogo vyvoda dlja ocenki sostojanija izoljacji kabel'nyh linij. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo jenergetičeskogo universiteta*. 2021; 1(49):191-203. (In Russ.).

14. Smekalov VV, Nazarov IA, Merzljakov AS, Romanov KK, et al. Avtomatizirovannaja sistema kontrolja tehničeskogo sostojanija osnovnogo oborudovanija magistral'nyh jelektricheskijh setej. *JeNERGIJa*. 2022; 1:32-41. (In Russ.).

15. Ivshin IV, Galjautdinova AR, Vladimirov OV, et al. Intellektual'naja sistema ocenki tehničeskogo sostojanija transformatornoj podstancii 35/6 (10) kV. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2022; 2:24-35. (In Russ.). dio: 10.30724/1998-9903-2022-24-2-24-35.

16. Levin VM, Guzhov NP, Chernenko NA, et al. Metodologija upravlenija remontami oborudovanija v jelektricheskijh setjah neftepromyslov. *Sistemy analiza i obrabotki dannyh*. 2020; 2-3(79):139-155. (In Russ.).

17. Bao Y, Wang Y, Huang G, et al. Impact of human error on electrical equipment preventive maintenance policy. In *2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, 2015. pp. 1-5.

18. Farzin N, Vakilian M, Hajipour E. Transformer practical turn-to-turn fault detection performance using negative sequence and space vector-based methods. In *2019 International Conference on Protection and Automation of Power System (IPAPS)*, 2019. pp. 1-6.

19. Dahiya R, Singh A. Review on Condition Monitoring and Maintenance of Electrical Equipment in Power Systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2020; 119:105848.

20. Li P, Wang C, Jiang L. An Overview of Condition-Based Maintenance for Power Systems. *Energies*. 2022; 15(9):2430.

21. Da Silva A.ML, Cassula AM, Billinton R, Manso LAF. Integrated reliability evaluation of generation, transmission and distribution systems. *IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution*, 2002. pp. 1-6.

22. Shpiganovich AN, Zatsepina VI, Shpiganovich AA, et al. Power-supply systems reliability control. *EAI Endorsed Transactions on Energy*, 2018. p.18(e10).

23. Emecheta SN, Nwajuonye RO, Okonkwo GC. Monitoring and Evaluation of The Reliability of Distribution Network with Distributed Generation. *Journal of Engineering Research and Reports*. 2021; 12:29-42.

24. Rivas AEL, Abrao T. Faults in smart grid systems: Monitoring, detection and classification. *Electric Power Systems Research*. 2020; p. 106602.

25. Leal A, Durán M, Botero JF. Reliability provision in software defined power substations communication networks. *Computer Networks*. 2020; p. 107560.

26. Ghiasi M, Ghadimi N, Ahmadiania E. An analytical methodology for reliability assessment and failure analysis in distributed power system. *SN Applied Sciences*, 2019; 1:44.

27. Grabchak EP. Ocenka tehničeskogo sostojanija jenergetičeskogo oborudovanija v uslovijah cifrovoj jekonomiki. *Nadezhnost' i bezopasnost' jenergetiki*. 2017; 4(10):2-16.

28. Kalinin AF, Eremina TV. Model' prognozirovaniya riska bezopasnosti i ocenki ostatochnogo resursa jelementov jelektroustanovki. *Michurinskij agronomičeskij vestnik*. 2018; 1:73-79. (In Russ).

29. Hlebcov AP, Zajnutdinova LH. Analiz sostojanija iznosa jelektrooborudovanija podstancij i metody djagnostirovanija avarijnyh rezhimov. *Jenergo- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport*. 2019; 2(27):17-20. (In Russ).

30. Antonenko IN. Risk-orientirovannyj podhod k upravleniju proizvodstvennyimi aktivami jenergetiki. *Jenergojeksport*. 2020; 1(73):26-33. (In Russ).

31. Soshnikov AA, Kompaneets BS. Kolichestvennye pokazateli v tehnologijah bezopasnosti. *Polzunovskij vestnik*. 2014; 4:119-123. (In Russ).

32. Kompaneets BS, Boyarkov DA. Electric grids technical evaluation method based on their failure probability. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 4th International Scientific and Technical Conference on Energy Systems, ICES 2019, Belgorod, 2020*. p. 012030. (In Russ).

Authors of the publication

Dmitrij A. Boyarkov – Altai State Technical University named after I.I. Polzunov, Barnaul, Russia. *dmitrij.bojarkov@gmail.com*.

Boris S. Kompaneets – Altai State Technical University named after I.I. Polzunov, Barnaul, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.3 Электроэнергетика

Получено **01.07.2024 г.**

Отредактировано **20.08.2024 г.**

Принято **16.09.2024 г.**