



РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАСЧЕТА ИНДЕКСА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕГАЗОВЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ 110 кВ

Балобанов Р.Н.¹, Латыпова А.А.²

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²Филиал АО «Татэнерго» Казанская ТЭЦ-2, г. Казань, Россия

rassel_ipek@mail.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ исследования заключается в разработке алгоритма автоматизированного расчета индекса технического состояния (ИТС) для элегазовых выключателей напряжением 110 кВ согласно методики расчета ИТС, разработанной Минэнерго России. ЦЕЛЬ. Провести анализ погрешностей, возникающих при расчете ИТС. Рассмотреть проблемы, возникающие при расчете ИТС и предложить пути решения данной проблемы. Выполнить ручной расчет индекса технического состояния элегазового выключателя ВЭБ-110 по утвержденной методике. Разработать рабочую версию алгоритма автоматизированного расчета индекса технического состояния (ИТС) для элегазовых выключателей напряжением 110 кВ согласно методики расчета ИТС, разработанной Минэнерго России. Провести расчет ИТС выключателя ВЭБ-110 с помощью созданного алгоритма. МЕТОДЫ. При решении поставленной задачи применялся метод моделирования методики расчета ИТС, реализованный в среде программирования Delphi7. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье описана актуальность темы, рассмотрены особенности расчета ИТС для разных видов выключателей. Определены погрешности, возникающие при ручном расчете ИТС. Произведен ручной расчет ИТС и расчет ИТС с помощью разработанного алгоритма для элегазового выключателя ВЭБ-110, проведен сравнительный анализ результатов расчета. В данной статье смоделирован рабочий алгоритм автоматизированного расчета ИТС для элегазовых выключателей типа ВЭБ-110. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Использование алгоритма автоматизированного расчета ИТС дает возможность значительно уменьшить (практически исключить) погрешности, возникающие при ручном расчете. Также сильно сокращается время расчета и появляется возможность более оперативного получения данных о состоянии выключателей. Разработанный алгоритм рекомендует управляющее воздействие на оборудование исходя из его состояния, тем самым облегчая планирование ремонтов, технических обслуживаний оборудования. Исходя из рассчитанного значения ИТС, осуществляется ранжирование выключателей по первоочередности включения в план технического обслуживания и ремонта (ТОиР).

Ключевые слова: элегазовый выключатель; индекс технического состояния; функциональный узел; состояние оборудования; автоматизация процесса.

Для цитирования: Балобанов Р.Н., Латыпова А.А. Разработка алгоритма автоматизированного расчета индекса технического состояния элегазовых выключателей 110 кВ // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т. 26. № 6. С. 132-146. doi: 10.30724/1998-9903-2024-26-6-132-146.

DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR AUTOMATED CALCULATION OF THE TECHNICAL CONDITION INDEX OF 110 kV GAS-INSULATED CIRCUIT BREAKERS

Balobanov R.N.¹, Latypova A.A.²

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²Branch of JSC «Tatenergo» Kazan CHPP-2, Kazan, Russia

rassel_ipek@mail.ru

Abstract: RELEVANCE of the study is to develop an algorithm for automated calculation of

the technical condition index (TCI) for 110 kV gas-insulated circuit breakers according to the TCI calculation method developed by the Ministry of Energy of Russia. **THE PURPOSE.** To analyze the errors arising at calculation of TCI. To consider the problems arising at calculation of TCI and to offer ways of the decision of the given problem. To perform manual calculation of the technical condition index of the VEB-110 gas-insulated circuit breaker according to the approved methodology. Develop a working version of the algorithm for automated calculation of the technical condition index (TCI) for 110 kV gas-insulated circuit breakers according to the TCI calculation methodology developed by the Ministry of Energy of Russia. To carry out TCI calculation of VEB-110 circuit breaker with the help of the created algorithm. **METHODS.** The method of modeling of the TCI calculation method implemented in the Delphi7 programming environment was used to solve the task. **RESULTS.** The article describes the relevance of the topic, considers the peculiarities of TCI calculation for different types of circuit breakers. Manual TCI calculation and TCI calculation with the help of the developed algorithm for VEB-110 gas-insulated circuit breaker are made, the comparative analysis of the calculation results is carried out. In this paper the working algorithm of automated calculation of ITS for gas-insulated circuit breakers of VEB-110 type is modeled. **CONCLUSION.** The use of the algorithm of the automated calculation of TCI gives an opportunity to reduce (practically to exclude) the errors arising at manual calculation. Also the calculation time is greatly reduced and there is a possibility of more operative obtaining of data on the state of circuit breakers. The developed algorithm recommends the control action on the equipment based on its condition, thus facilitating the planning of repairs, maintenance of equipment. Based on the calculated TCI value, the circuit breakers are ranked according to the priority of inclusion in the maintenance plan.

Keywords: gas-insulated circuit breaker; technical condition index; functional unit; equipment condition; process automation.

For citation: Balobanov R.N., Latypova A.A. Development of an algorithm for automated calculation of the technical condition index of 110 kV gas-insulated circuit breakers. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (6): 132-146. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-6-132-146.

Введение и литературный обзор (Introduction and Literature Review)

Министерство энергетики Российской Федерации предложило методику для оценки технического состояния, которая включает вычисление показателя устройства с использованием формулы из соответствующей методики. Этот расчет основан на весовых коэффициентах, индивидуально назначаемых для каждого параметра функционального блока устройства. Для газовых выключателей ИТС количество учитываемых параметров может варьироваться от 33 до 65, и для каждого из них приводится от 2 до 5 условий, необходимых для проведения оценки. В результате выполнение расчета ИТС для одного устройства требует значительной ручной работы, высоких затрат труда и времени [1]. Целью данного исследования является совершенствование системы оценки технического состояния газовых выключателей и оптимизация процесса ее расчета путем создания алгоритма автоматического расчета, реализующего требования современных нормативных документов. Научная новизна исследования состоит в том, что в работе смоделирована программа, позволяющая определять индекс состояния элегазового выключателя и выводящая рекомендации по дальнейшим воздействиям на оборудование. Практическая значимость полученных результатов также состоит в том, что программа позволяет увидеть узкие места выключателя (параметры с наименьшей балльной оценкой) и более оперативно среагировать, предупредить возможные дефекты. Использование данной программы позволяет оптимизировать процесс расчета ИТС и повысить эффективность мониторинга за техническим состоянием выключателей.

В ходе исследования были изучены российские и зарубежные научные статьи, в которых выделяется выбранная тема.

Элегазовые выключатели SF₆ занимают важное место в энергосистемах высокого напряжения, благодаря своим уникальным свойствам: высокой диэлектрической прочности, устойчивости к высоким температурам и долговечности. Однако для их эффективной работы необходима постоянная диагностика и мониторинг состояния, что требует разработки современных методов и алгоритмов. В статье [2] рассматривается

структура и особенности элегазовых выключателей, а также подчеркивается необходимость в разработке комплексных диагностических систем для мониторинга их состояния.

Современные подходы к диагностике высоковольтных выключателей базируются на мониторинге ключевых параметров, таких как давление газа, влажность, электрические и механические характеристики. В исследовании Gomes et al., 2020 подчеркивается значимость непрерывного мониторинга этих параметров для предотвращения аварийных ситуаций и оптимизации технического обслуживания оборудования [3]. В частности, мониторинг давления SF₆ и уровня влажности помогает выявить потенциальные утечки и ухудшение изоляции.

Статья [4] учитывает подход оценки обязательных показателей технического состояния (ТС) электрооборудования на основе современных нормативных документов. Авторы анализируют текущую методологию и приводят основные недостатки существующего подхода. Это связано с тем, что отсутствует статистическая информация о диагностических значениях параметров оборудования технического состояния и методах определения параметров его функциональных узлов, весовые коэффициенты группы параметров функциональных узлов оборудования ТС методами экспертной оценки. При этом группа параметров ТС средства может быть изменена в зависимости от методов диагностики, используемых компанией. По мнению авторов, значения полученных условных показателей могут быть использованы для определения «показателей надежности оборудования и планирования мероприятий по ТОиР».

Для расчета индекса технического состояния важно учитывать не только физические параметры (давление и влажность газа), но и временные характеристики работы механизма, вибрационные сигнатуры и электрическое сопротивление контактов. В статье [5] предложена система интеграции данных с различных датчиков для более точного анализа состояния выключателей и расчета индекса их надежности. Комбинированный подход позволяет учитывать специфику каждого узла оборудования, что улучшает точность диагностики.

С. В. Мезин, А. В. Благочиннов, Ш. М. Милитонян, С. А. Агринская [6] создали профессиональную систему, которая может изменять структуру и базу знаний, дополнять ее и решать множество задач по выявлению технического состояния оборудования. Авторы предлагают новый подход к оценке технического состояния оборудования, а также приводят примеры расчетов на основе весовых показателей функциональных компонентов оборудования. Программная модель представлена на VBA Excel, внутреннем языке программирования для программ Microsoft Office. Этот алгоритм имеет некоторые общие черты с алгоритмом автоматического расчета, предложенным в данной статье.

Хальясмаа Александра Ильмаровна в [7] отмечает о важности интеллектуализации процессов обработки и анализа данных. По ее мнению, «интеллектуализация связана как с необходимостью использования эксплуатационного опыта, так и получения объективных оценок состояния оборудования вне зависимости от квалификации персонала». Научная новизна ее работы состоит в том, что в работе доказана возможность решения задачи комплексной оценки технического состояния сложного объекта на основе нейро-нечеткого логического вывода. Данный способ использует агрегированную информацию об объекте исследования и сформулированные экспертные знания с учетом эксплуатационного опыта.

В [8] предложен методологический подход к определению набора характеристик технического состояния в многоэтапных системах диагностического обследования. Исследование статистических данных и опытом использования парка высоковольтных выключателей показало, что надежность, безопасность и эффективность работы элегазовых выключателей обуславливаются всеми жизненными стадиями, включая научные исследования, производство, выбор и проектирование, а также эксплуатацию. Было разработано несколько новых методов для определения индекса технического состояния этих выключателей и методика проверки их фарфоровых корпусов с помощью ультразвуковой структурометрии, а также классификация примесей, возникающих на каждом этапе жизненного цикла элегаза. Доказано, что комплексное обследование эффективно решает ключевые задачи, связанные с обеспечением надежности и эффективности эксплуатации выключателей.

Методы машинного обучения активно используются для обработки и анализа данных о состоянии оборудования. В [9] описаны алгоритмы классификации и прогнозирования, которые помогают выявить потенциальные неисправности и оценить

оставшийся срок службы коммутационных аппаратов. Машинное обучение, включая нейронные сети, помогает повысить точность диагностики и мониторинга состояния оборудования и стало важным инструментом для автоматизации процесса оценки.

Автоматизация процесса диагностики требует разработки алгоритмов для автоматического расчета индекса состояния на основе данных, полученных от множества различных датчиков. В исследовании [10] описывается концепция Интернета вещей (IoT) и ее роль в удаленном мониторинге и диагностике высоковольтного оборудования, включая элегазовые выключатели. Применение IoT позволяет собирать данные в реальном времени и анализировать их на удаленных серверах, что упрощает эксплуатацию и обслуживание оборудования.

Хотя автоматизированные системы мониторинга приносят значительные улучшения в процесс эксплуатационной надежности, они также сталкиваются с рядом сложностей, включая обработку больших объемов данных, необходимость в высококачественных датчиках и алгоритмах, а также в обеспечении безопасности данных. В работе [11] отметили ключевые проблемы в управлении и хранении данных для анализа состояния выключателей. Решение данной проблемы предложили [12] методики улучшения качества данных с использованием методов разреженного моделирования.

В статьях [13] и [14] описаны успешные внедрения систем автоматического мониторинга и расчета индекса технического состояния для высоковольтных выключателей. Внедрение таких систем позволяет продлевать срок эксплуатации оборудования, снижать затраты на его обслуживание и предотвращать аварийные ситуации благодаря своевременной диагностике.

В [15] приведен анализ информации о совместном использовании показателей надежности и индекса технического состояния при оценке состояния основного электрооборудования на примере схем распределения электроэнергии в энергосистему современных тепловых электростанций. Авторами предложено ввести новый параметр – индекс технического состояния на отказ. Оценка технического состояния проводится путем сравнения фактических параметров функциональных узлов с установленными нормами и рекомендациями производителей. Это позволяет определить индекс технического состояния до выхода из строя, что необходимо для планирования ремонтных работ и предотвращения аварийных ситуаций. В статье представлены результаты исследования алгоритмов, которые позволяют сформировать улучшенный подход к планированию ремонтной программы с учетом особенностей эксплуатации оборудования.

Таким образом, можно найти немало количество научных статей, научных публикаций, в которых предлагается какой-то новый подход расчета индекса технического состояния, определяются особенности расчета того или иного параметра. Но мало работ, в которых бы поднимался вопрос оптимизации именно существующей методики расчета ИТС [16, 17], разработанной Минэнерго России. Возможно, при более быстром и удобном способе проведения расчета, эта методика была бы намного эффективной и результативной. В дальнейшем возможно еще большая оптимизация расчета таким образом, что ИТС будет рассчитываться в момент реального времени. Это реализуется путем установки датчиков, измерительных приборов непосредственно на оборудование и данные измерений передаются в какой-то центральный узел. Данная программа осуществляет вычисления, что позволяет в любое время отслеживать индекс технического состояния оборудования. Это значительно упростит процесс мониторинга и диагностики, а также поможет в предотвращении аварий. При внедрении такого метода, он может стать основой для перехода от планово-предупредительных ремонтов в электроэнергетике к ремонту, основанному на фактическом состоянии оборудования.

Материалы и методы (Materials and methods)

При расчете индекса технического состояния выключателей участвуют разное количество параметров в зависимости от вида выключателей в первую очередь на него влияют отличия и конструктивные особенности этих выключателей. В данной статье приводится анализ расчета ИТС элегазовых баковых выключателей.

Основное отличие этих выключателей в среде, используемой для прерывания тока: в элегазовых выключателях для отведения тепла (охлаждения выключателя) и создания изолирующей дугогасящей среды используется элегаз, или шестифтористая сера (SF₆ – гексафторид серы) – неорганическое вещество, при стандартных условиях представляющая собой тяжёлый газ.

Электрическая прочность среды, в которой гасится дуга, является одной из

ключевых характеристик выключателей. В частности, элегаз демонстрирует высочайшую диэлектрическую прочность, что особенно важно при напряжении 110 кВ и выше. Другим важным параметром является коммутационный ресурс выключателя, определяющий количество рабочих циклов. Этот ресурс зависит от величины коммутируемых токов: чем выше ток, тем быстрее ресурс выключателя исчерпывается.

Все виды выключателей рассчитаны на заданное количество отключений в зависимости от величины отключаемых токов, будь то номинальные или отключаемые токи вплоть до нескольких десятков кА. По окончании ресурса элегазовый выключатель нуждается в капитальном ремонте, во время которого оценивается его состояние и определяется возможность дальнейшего использования.

Текущая методика определения ИТС включает такие параметры, большинство из которых невозможно выявить в ходе обычной эксплуатации объекта, даже с использованием существующих автоматизированных систем диагностики. Поэтому объекты требуют обследования во время плановых ремонтов на основе данных диагностических осмотров и испытаний. Выключатель ВЭБ-110 отличается высокой устойчивостью к переключениям и механическим нагрузкам. При правильной эксплуатации он имеет длительный срок службы, не требует ремонта до 20 лет. Однако для обеспечения надежной работы в период между ремонтами необходимо проводить техническое обслуживание, включающее регулярный визуальный осмотр и контроль состояния, профилактические мероприятия, не требующие демонтажа опоры, для повышения надежности выключателя. В таблице 1 приведены работы по техническому обслуживанию выключателя и сроки их завершения с момента ввода в эксплуатацию.

Таблица 1

Перечень операций по техническому обслуживанию выключателя

№	Наименование операции	Рекомендуемая периодичность проведения				
		ежемесячно	через 5 лет	через 10 лет	через 15 лет	через 20 лет
1	Контроль давления элегаза	+	-	-	-	-
2	Снятие показаний счетчика операций	-	+	+	+	+
3	Контроль загрязненности и отсутствия повреждений фарфоровых изоляторов	-	+	+	+	+
4	Контроль уплотнений кожуха передаточного устройства	-	+	+	+	+
5	Контроль и подтяжка резьбовых соединений	-	+	+	+	-
6	Осмотр и смазка шарнирных соединений горизонтальной передачи, а также узлов трения отключающего механизма	-	-	+	-	+
7	Контроль влажности элегаза в выключателе	-	-	-	-	+
8	Измерение электрического сопротивления главной цепи токопровода	-	+	+	+	+
8	Измерение электрического сопротивления главной цепи токопровода	-	+	+	+	+
9	Оценка эрозийного износа дугогасительных контактов методом определения момента их замыкания	-	-	+	-	+
10	Измерение собственных времен включения и отключения выключателя	-	-	+	-	+
11	Проведение среднего ремонта с разборкой полюсов выключателя, с заменой уплотнений и изношенных узлов и деталей	-	-	-	-	+
12	Проверка трансформаторов тока	-	-	+	-	+

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

Чтобы обеспечить надежность и безопасность работы оборудования на Казанской ТЭЦ-2, ежегодно проводится техническое обслуживание элегазовых выключателей. По завершении работ составляется протокол с результатами тестов и измерений. Если какие-либо параметры оборудования, выведенного на текущий ремонт, не могут быть обновлены из-за отсутствия необходимых проверок и испытаний, их значения остаются

такими же, как и в предыдущем году при расчете индекса технического состояния (ТС).

Оценка состояния оборудования базируется на следующей информации:

- данные от производителя оборудования (заводские параметры и диапазоны их изменений);
- результаты технической диагностики в процессе входного контроля (до монтажа, после монтажа, в ходе монтажа, до и после технического воздействия);
- испытательные данные (пусковые, режимные и наладочные после монтажа и технического воздействия, предремонтные, режимно-эксплуатационные);
- данные мониторинга и диагностики, собранные в процессе эксплуатации (данные обходов и осмотров, дефектные журналы, суточные ведомости, результаты технических освидетельствований и автоматизированные системы управления процессом).

Согласно нормативным документам, оценка технического состояния основывается на данных, а его конфигурация учитывает структуру устройства. На основе этого формируется база данных для оценки с учетом влияния различных характеристик на высоковольтные газовые выключатели. Это позволяет создавать заказы на оценку технического состояния и определение технического воздействия. Одной из основных задач является определение интегрального показателя состояния (ИТС) для принятия решений в области технического воздействия на коммутационные аппараты в зависимости от его состояния [16].

Результатами оценки технического состояния элегазового выключателя являются:

- ИТС функциональных узлов;
- ИТС элегазового выключателя.

Все оборудование разделяется на функциональные блоки, каждый из которых представляет собой основную сборочную единицу и оказывает влияние на общую производительность системы. Для каждого блока определяется набор параметров, характеризующих его техническое состояние. Это состояние оценивается путем сравнения фактических значений с установленными стандартами и рекомендациями производителя. Для вычисления индекса состояния (ИС) оборудования рассматривается индекс состояния каждого функционального блока, который составляется из различных параметров, учитывающих их влияние на надежность блока в целом. Возможно использование диагностических параметров, определяющих состояние нескольких функциональных единиц оборудования.

Идентификацией параметров состояния и их допустимых значений занимаются эксперты в области техники, опираясь на ранее предоставленные данные и классификационные критерии, разработанные компанией. Для каждого функционального блока составляется предварительный список параметров, который может корректироваться экспертной комиссией с учетом специфики применения.

Каждый параметр состояния функционального блока оценивается по балльной шкале, которая указывает на степень отклонения фактических значений от максимально допустимых, определенных нормативно-технической документацией (НТД). Эта шкала служит для качественной оценки состояния функционального блока и оборудования в целом, отражая уровень соответствия выполняемым функциям.

«4» – отсутствует отклонение измеренных параметров от требований НТД, оборудование выполняет требуемые функции в полном объеме;

«3» – измеренные параметры находятся в пределах значений, определенных в НТД, но появилась тенденция ухудшения значения такого параметра;

«2» – измеренные параметры находятся в пределах значений, определенных в НТД, но возникает угроза наступления отказов;

«1» – измеренные параметры находятся на уровне предельно-допустимых значений, определенных в НТД, оборудование выполняет требуемые функции не в полном объеме;

«0» – измеренные параметры находятся за пределами предельно-допустимых значений, определенных в НТД.

Для определения технического состояния конкретного функционального узла или сборочной единицы оборудования применяется следующее выражение:

$$ИТСУ = 100 \times \sum \frac{i(KB_i \times ОГП_i)}{4} \quad (1)$$

где:

KB_i – значение весового коэффициента для i -ой группы параметров технического

состояния;

$ОП_i$ – балльная оценка i -ой группы параметров технического состояния.

Балльная оценка группы параметров ТС определяется как минимальная оценка технических параметров, входящих в данную группу. Для определения технического состояния всего оборудования применяется аналогичное выражение, где суммируются произведения весовых коэффициентов ($КВУ_i$) и индексов технического состояния ($ИТСУ_i$) каждого функционального узла или обобщенного узла:

$$ИТСУ = \sum (КВУ_i \times ИТСУ_i) \quad (2)$$

где:

$КВУ_i$ – значение весового коэффициента для i -го функционального узла или обобщенного узла;

$ИТСУ_i$ – индекс технического состояния i -го функционального узла или обобщенного узла.

В случае наличия у оборудования нескольких функциональных узлов одного вида для расчета ИС оборудования используется минимальный ИС среди таких функциональных узлов.

При эксплуатации могут появляться дефекты, которые незначительно влияют на индекс состояния и не учитываются по причине того, что дата расчета еще не наступила, признаки дефектов незначительные или произошли неожиданные события с высокими рисками, например, отказ оборудования. Однако попытка преждевременно устранить такие дефекты может привести к выходу оборудования из строя.

Для решения этой проблемы требуется внедрение дополнительных правил для определения ИС:

- если индекс ИС функционального узла превышает значение 0,25, но оценка 1 из параметров, влияющих на снижение ИС оборудования таких узлов, равна 0, то ИС таких узлов присваивается значение 0,25 (критическая и неудовлетворительная граница ТС).
- если общий индекс технического состояния оборудования превышает 0,50, а индекс технического состояния любого из его функциональных блоков не превышает 0,25, индекс технического состояния оборудования устанавливается равным 0,50, что соответствует пограничному состоянию неудовлетворенности и удовлетворения.
- если какой-либо из методов, используемых компанией для определения параметров транспортного средства, указывает на критическое состояние оборудования, независимо от значения ИС, в техническом описании этого метода такие параметры могут также включать показатели, отражающие состояние расходных материалов).

Приведенная выше модель может быть адаптирована при использовании для определения ИС сложных объектов электросетевого хозяйства (таких как подстанции), но это является предметом работы, которую можно рассмотреть в дальнейших статьях.

Газовые выключатели марки ВЭБ-110ИВ-40/2500-УХЛ1 относятся к классу группы «Электрооборудование», к классу оборудования «выключатели». Функциональными компонентами коммутационного аппарата являются работа контактных систем, систем изоляции, других коммутационных устройств и обобщенных узлов. Эти узлы содержат несколько групп параметров функциональных узлов и состоят из множества параметров, по которым оценивается состояние коммутационного аппарата.

В качестве примера был взят элегазовый выключатель марки ВЭБ-2-110ИВ-40/2500-УХЛ1, установленный на Казанской ТЭЦ-1.

Преимущества выключателя ВЭБ-2-110ИВ-40/2500-УХЛ1:

- использование элегаза (SF_6) в качестве дугогасительной среды, что обеспечивает высокую надежность и эффективность отключения дуги.
- компактная конструкция, упрощающая интеграцию в существующие системы.
- высокая степень автоматизации и совместимость с интеллектуальными системами управления.
- долговечность и низкие эксплуатационные расходы благодаря минимальному техническому обслуживанию.

Кроме того, в таблице 2 приведен расширенный ручной расчет показателя технического состояния для этого коммутатора.

Таблица 2

Расчет индекса технического состояния ВЭБ-110IV-40/2500-УХЛ1

Функциональный узел	Составляющие	Параметр технического состояния	Расчетный индекс технического состояния
1	2	3	4
Контактная система	Состояние контактной системы	Аномальный локальный нагрев поверхности в зоне дугогасящей камеры/верхнего фланца выключателя по результатам тепловизионного контроля	0,45
		Максимальное сопротивление контактной системы	0,33
		Тенденция изменения максимального сопротивления контактной системы от предыдущего измерения $\Phi_{пред}$	0,45
		Время включения выключателя	0,45
		Тенденция времени включения	0,45
		Время отключения выключателя	0,45
		Тенденция времени отключения	0,45
	Состояние внешних контактных соединений (кроме высоковольтных вводов)	Степень развития дефекта контактных соединений по результатам тепловизионного контроля	0,275
		Загрязнение контактных соединений	0,275
		Окисление контактных соединений	0,275
		Неисправность контактных соединений	0,275
	Ресурс	Механическая износостойкость (механический ресурс)	0,275
		Коммутационная износостойкость (коммутационный ресурс)	0,275
Изоляционная система	Состояние внешней изоляции подвижных частей	Трещина фарфоровой покрывки	0,5
		Сколы фарфоровой покрывки/внешней изоляции	0,5
	Состояние элегаза (или смеси элегаза)	Срабатывание датчика плотности элегаза 1 степени	0,5
		Пониженное давление элегаза в полюсе (более чем на 5%) по сравнению с другими полюсами	0,5
		Повышенное давление элегаза (более чем на 5%)	0,5
		Неисправность сигнализатора плотности %	0,5
Прочее оборудование	Неисправности «механической части»	Неисправность заводного устройства	0,5
		Неисправность механизма включения/отключения	0,5
		Недопустимая деформация металлоконструкций	0,5
		Неисправность указателя положения	0,5
		Разрушение сварных швов положения	0,5
		Сквозная коррозия	0,5
		Неисправность денсиметра	0,5
	Неисправности «электрической части»	Неисправность блок- контактов	0,5
		Неисправность обогрева полюсов выключателя	0,5
		Неисправность обогрева привода выключателя	0,5
		Нарушение заземления выключателя	0,5
		Повреждение пусковых электромагнитов управления	0,5
Обобщенный узел		Срок службы (за исключением высоковольтных вводов)	0,5

ИТС элегазового выключателя ВЭБ-110 согласно формулам 1 и 2 составил: 87,7875

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

В ходе исследования произведен «ручной» расчет ИТС выключателя ВЭБ-110. ИТС выключателя составил 87,7875, что соответствует очень хорошему состоянию оборудования. Результаты «ручного» расчета будут эталонными значениями для проверки достоверной работы программы, приведенной в следующей главе.

Определение индекса технического состояния представляет собой сложный процесс, требующий обработки большого объема данных. Исходные данные зачастую задаются человеком, что может привести к субъективным ошибкам. Устранение этих ошибок может существенно повысить точность оценки состояния оборудования.

Основные причины ошибок на этапах оценки состояния оборудования включают:

- многократную передачу данных между различными информационными средами, что может повлечь искажение значений;
- «ручной» расчет параметров, их групп и функциональных узлов;
- округление результатов во время расчета.

В таблице 3 представлены действия специалистов при оценке состояния оборудования и возможные источники ошибок в этих процессах.

Использование современных информационных технологий, включая программное обеспечение и автоматизированные рабочие станции, способствует значительному снижению или даже полному исключению ошибок. Программные разработки эффективно устраняют ошибки, возникающие на этапах от третьего до шестого, так как обработка измерений и их сопоставление с нормативными показателями осуществляется по заранее заданным в программе алгоритмам и формулам. Кроме того, при вычислении индекса состояния с помощью программных средств данные не округляются. Это позволяет получить более точное значение индекса и обеспечивает формирование более надежных управляющих решений.

Таблица 3

Возникновение погрешности на этапах оценки ТС

Этапы	Операции	Факторы возникновения погрешности
1	Считывание данных с измерительных приборов	Ошибка считывания (разрядность, «зависание» прибора, недостающие данные)
2	Внесение данных в журнал	Ошибка фиксации (неверная запись считанного значения)
3	Перевод единиц измерения (при необходимости)	Ошибка перевода
4	Приведение измеренных значений к стандартным условиям	Ошибка приведения к стандартным условиям, округление значений
5	Сравнение приведенных значений с нормативными параметрами	Ошибка сравнения
6	Заключение оценки технического состояния	Формирование ложного заключения

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

Вероятность возникновения погрешности на 2 этапе остается и обусловлена необходимостью переноса человеком данных измерений, зафиксированных в журнале на месте установки оборудования, в программу. В дальнейшем можно исключить появление этой погрешности, если еще больше оптимизировать расчет таким образом, что ИТС будет рассчитываться в момент реального времени. Как уже говорилось ранее, это реализуется путем установки датчиков, измерительных приборов непосредственно на оборудование и данные измерений передаются в какой-то центральный узел, откуда автоматически «сажаются» на ячейки программы. Тем самым программа проводит расчет, и в каждый момент времени можем наблюдать индекс технического состояния оборудования. В этом случае, не будет неточностей при вводе исходных данных в программу и при переносе данных с журнала, так как данные автоматически будут считываться из измерительных приборов.

Разработка программы для расчета ИТС выключателей имеет потенциал существенно снизить количество возникающих ошибок, связанных с оценкой их состояния. Этот шаг не только минимизирует вероятность неточностей, но и создаёт основу для дальнейшего развития и улучшения системы мониторинга и диагностики технического состояния выключателей. Автоматизация данного процесса откроет новые перспективы для более точного и надежного анализа, что, в свою очередь, окажет положительное влияние на эффективность всей электрической сети. Инновационные технологии и алгоритмы, заложенные в программе, будут способствовать не только улучшению текущих показателей, но и позволят адаптироваться к будущим изменениям и требованиям в области энергетики. Таким образом, создание и внедрение этой программы станет важным шагом на пути к расширенной цифровизации и модернизации технических процессов в энергетике.

Результаты и обсуждение (Results and discussions)

Программа для автоматизированного расчета Индекса Технического Состояния (ИТС) была создана в среде программирования Delphi7. Ее принцип работы можно описать следующим образом:

1. Оператор вводит в программу первоначальные данные, которые получены из

протоколов диагностики и испытаний оборудования.

2. Программа определяет ИТС и предлагает соответствующие меры управления, такие как:

- Вывод оборудования из эксплуатации, его техническое перевооружение или реконструкция;
- Проведение дополнительного технического обслуживания и ремонта, усиление контроля за техническим состоянием, обновление оборудования;
- Усиление контроля за состоянием, проведение капитального ремонта или реконструкции;
- Действия на основе результатов планового диагностирования;
- Проведение планового диагностирования.

3. Оператору предоставляется окно с индексами технического состояния всех единиц оборудования, сгруппированными по уровню их важности. Здесь учитывается значимость оборудования на объектах, таких как подстанции и электростанции, поскольку сбои в работе ключевых элементов могут привести к значительным финансовым потерям и серьезным авариям в энергосистеме. Таким образом, необходимо на каждом объекте определять индекс важности оборудования.

Схематичное изображение работы программы представлено на рисунке 1.

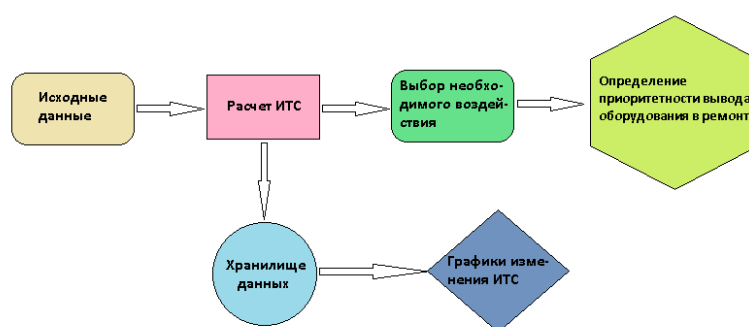


Рис. 1. Алгоритм работы программы

Fig. 1. Program operation algorithm

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

Таким образом, исходя из информации о важности оборудования, а также о его индексе технического состояния и категории приоритетности оборудования осуществляется ранжирование оборудования по первоочередности включения в план ТОиР.

Окно работы программы выглядит следующим образом (рис. 2):

Рис. 2. Окно работы программы

Fig. 2. Program window

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

После ввода оператором всех исходных данных, нажимаем кнопку «Расчет ИТС узлов» для расчета индекса каждого функционального узла и вывода этих значений в поля мемо. Далее нажатием кнопки «Расчет ИТС выключателя» рассчитывается ИТС выключателя и выводится в поле мемо результат расчета и рекомендации по дальнейшей эксплуатации выключателя.

Результаты расчета ИТС элегазового выключателя ВЭБ-110 показаны на рисунке 3. Значение ИТС выключателя получилось в точности таким же, как и при «ручном» расчете, что говорит о том, что программа работает достоверно. Для визуального восприятия дополнительно в поле мемо применяется заливка.

Рис. 3. Пример расчета ИТС выключателя ВЭБ-110

Fig. 3. Example of calculation of the ITS of the VEB-110 circuit breaker

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

Программа расчета индекса технического состояния элегазовых выключателей – это важный инструмент для обеспечения надлежащей работы электрооборудования. Для создания такой программы необходимо определить набор параметров, которые будут влиять на оценку состояния выключателей, а также разработать математические модели и алгоритмы для проведения расчетов.

Часть кода представлена на рисунке 4.

```

if m/10000>=1 then x12:=0;
if (m/10000<0.9) or (m/10000>=0.9) and (m/10000<1)) then x12:=0.1375;
if m/10000<0.9 then x12:=0.275;
//memo1.Lines.Add('x12 = '+FloatToStr(x12));
k:=strtoint(edit8.Text); //проверить сами условия
if k/5000>=1 then x13:=0;
if (k/5000<0.9) or (k/5000>=0.9) and (k/5000<1)) then x13:=0.1375;
if (k/5000<0.9) then x13:=0.275;
//memo1.Lines.Add('x13 = '+FloatToStr(x13));
//сравниваем
min1:=x1;
if x2<x1 then min1:=x2;
if x3<x2 then min1:=x3;
if x4<x3 then min1:=x4;
if x5<x4 then min1:=x5;
if x6<x5 then min1:=x6;
if x7<x6 then min1:=x7;
//memo1.Lines.Add('min1 = '+FloatToStr(min1));
min2:=x8;
if x9<x8 then min2:=x9;
if x10<x9 then min2:=x10;
if x11<x10 then min2:=x11;
//memo1.Lines.Add('min2 = '+FloatToStr(min2));
min3:=x12;
if x13<x12 then min3:=x13;
//memo1.Lines.Add('min3 = '+FloatToStr(min3));
y1:=(min1+min2+min3)*100*0.33;
memo1.Lines.Add('y1 = '+FloatToStr(y1));
//изоляция система
//внешняя изоляция
if combobox6.ItemIndex=0 then x14:=0.5;
if combobox6.ItemIndex=1 then x14:=0.25;
//memo2.Lines.Add('x14 = '+FloatToStr(x14));
if combobox7.ItemIndex=0 then x15:=0.5;
if combobox7.ItemIndex=1 then x15:=0.375;
//memo2.Lines.Add('x15 = '+FloatToStr(x15));
r1:=strtofloat(edit9.Text); //проверить сами условия
if r1/1>1 then x16:=0;
if (r1/1=1) or ((r1/1>1) and (r1/1<1.1)) or (r1/1=1.1) then x16:=0.25;
if r1/1>1.1 then x16:=0.5;

```

Рис. 4. Часть кода программы для расчета ИТС

Fig. 4. Part of the program code for calculating ITS

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

Внедрение вышеописанного алгоритма расчета ИТС позволит персоналу намного оперативнее получить информацию по состоянию элегазовых выключателей. Одним из основных преимуществ будет сокращение времени, затрачиваемого на проведение

расчетов индекса технического состояния элегазовых выключателей. Это позволит снизить трудозатраты специалистов и повысить производительность труда.

Для оценки экономического эффекта необходимо провести сравнительный анализ затрат на проведение расчетов до и после внедрения разработанного алгоритма, а также оценить экономические последствия возможных аварийных ситуаций, которые могли бы быть предотвращены благодаря автоматизированному расчету.

Экономический эффект от внедрения разработанного алгоритма автоматизированного расчета индекса технического состояния элегазовых выключателей 110 кВ можно рассчитать по следующей формуле:

Экономический эффект = Затраты на трудоемкость расчетов до внедрения программы - Затраты на трудоемкость расчетов после внедрения программы.

К примеру, на Казанской ТЭЦ-2 данный расчет выполняет инженер производственно-технического отдела. Заработная плата в среднем составляет 60000 рублей в месяц. Допустим, среднее количество рабочих часов в месяц составляет 160 часов. Тогда можем определить сколько стоит час работы инженера, который занимается расчетом ИТС, он составит 375 руб./час.

Для расчета индекса технического состояния одного элегазового выключателя необходимо 2 часа рабочего времени. Тогда получим 750 руб. Элегазовых выключателей на напряжение 110 кВ на Казанской ТЭЦ-2 всего 21 штук. Тогда для расчета ИТС 21 выключателя необходимо 15750 руб. в месяц.

После внедрения программы расчета ИТС на проведение расчета понадобится полчаса рабочего времени. Это в 4 раза меньше, чем при ручном расчете ИТС выключателей.

Тогда экономия за месяц составит 11812,5 руб. Учитывая, что расчет индекса технического состояния электрооборудования проводится ежемесячно, полученное значение умножим на количество месяцев в году и получим 141750 руб./год.

Таким образом, приходим к выводу, что при внедрении данной программы на производстве предприятие сэкономит кучу рабочего времени, которую можно направить на решение других важных вопросов, и 141750 рублей в год.

Также здесь стоит учитывать увеличение точности расчетов – экономии, полученную за счет повышения качества и точности расчетов индекса технического состояния. Автоматизация процесса позволяет значительно снизить (практически исключить) погрешности, которые с большей вероятностью могут возникнуть при ручном расчете.

Для оценки экономического эффекта необходимо провести сравнительный анализ затрат на проведение расчетов до и после внедрения разработанного алгоритма, а также оценить экономические последствия возможных аварийных ситуаций, которые могли бы быть предотвращены благодаря автоматизированному расчету. Также следует учитывать стоимость разработки и внедрения алгоритма, обучение персонала, поддержку и обновление системы. После анализа всех этих факторов можно оценить общий экономический эффект от внедрения разработанного алгоритма.

Заключение (Conclusions)

Автоматизация процессов представляет собой разработку специализированного программного обеспечения или инструментов, которые могут значительно ускорить и упростить выполнение задач, ранее требующих участия человека, таких как расчет Индекса Технического Состояния (ИТС). Использование автоматизации в этом контексте позволяет не только оперативно и эффективно вычислять ИТС, но и практически исключает риски возникновения ошибок, которые часто присущи ручным расчетам.

Предлагаемая программа занимается не только расчетом ИТС, но также производит аналитику полученных результатов. Она рекомендует управляющие меры, основываясь на значении индекса. Помимо этого, информация о важности оборудования, его техническом состоянии и приоритетности позволяет системе автоматически ранжировать оборудование по степени необходимости включения в план технического обслуживания и ремонта (ТОиР).

Внедрение подобной программы имеет множество преимуществ. Во-первых, это значительное сокращение времени, необходимого для проведения сложных расчетов. Во-вторых, точность расчетов обеспечивается на самом высоком уровне за счет минимизации человеческого фактора и его ошибок. Наконец, такой подход позволяет оптимизировать затраты, как временные, так и финансовые, что немаловажно в условиях современного бизнеса и производства.

Литература

1. Латыпова, А. А. Разработка алгоритма автоматизированного расчета индекса технического состояния элегазовых выключателей 110 КВ / А. А. Латыпова // Научная деятельность в условиях цифровизации: теоретический и практический аспекты : Сборник статей Международной научно-практической конференции, Екатеринбург, 01 июня 2024 года. – Уфа: ООО "Аэтерна", 2024. – С. 46–49.
2. Zhang Y., Wang L., Chen J., et al. Overview of SF6 Circuit Breakers: Development, Diagnosis, and Challenges // IEEE Transactions on Power Delivery. 2019. Vol. 34, No. 2. P. 800–812.
3. Gomes P., Silva R., Santos M., et al. Condition Monitoring of SF6 Circuit Breakers: Parameter Analysis and Practical Implementations // Journal of Electrical Engineering. 2020. Vol. 71, No. 3. P. 245–256.
4. Назарычев, А. Н. Совершенствование методики определения индекса технического состояния электрооборудования / А. Н. Назарычев, Д. А. Андреев // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики : в 2-х книгах, Ташкент, 23–27 сентября 2019 года / Ответственный редактор Воропай Н.И.. Том Книга 1, Выпуск 70. – Ташкент: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, 2019. – С. 316–326. – EDN LKPEPR.
5. Jiang X., Li H., Wu Z., et al. Integration of Multiple Sensors for Condition Assessment of High-Voltage Circuit Breakers // Electric Power Systems Research. 2021. Vol. 193. Article ID 106923.
6. Мезин С.В., Благодичнов А.В., Милитонян Ш.М., Агринская С.А. Разработка нового подхода к оценке технического состояния оборудования для целей создания экспертных систем // Вестник МЭИ. 2023. № 4. С. 146—154. DOI: 10.24160/1993-6982-2023-4-146-154
7. Халыясмаа, А. И. Разработка системы оценки технического состояния электросетевого оборудования на основе нейро-нечеткого логического вывода: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / А. И. Халыясмаа. – Екатеринбург : [б. и.], 2015. – 24 с.
8. Лукьянов, М. Р. Алгоритм программно-технического комплекса для расчета индекса технического состояния электрооборудования и выбора управляющего воздействия / М. Р. Лукьянов // НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ студентов и УЧАЩИХСЯ: сборник статей Международной научно-практической конференции в 2 частях, Пенза, 30 мая 2021 года. Том Часть 1. – Пенза: Наука и Просвещение, 2021. – С. 41–44. – EDN AUFHQI.
9. Liu H., Zhao Y., Wei X., et al. Machine Learning Applications in Condition Monitoring of High Voltage Equipment // IEEE Access. 2018. Vol. 6. P. 41401–41411.
10. Fernandez R., Torres D., Alvarez S., et al. IoT-based Monitoring and Diagnostics for High Voltage Equipment: A Case Study on SF6 Breakers // Energy Informatics. 2022. Vol. 5, No. 1. Article ID 9.
11. Zhang, Xihai & Zhang, Fangfang & Junhe, Wan & Kou, Lei & Ke, Wende. (2022). Review on Evolution of Intelligent Algorithms for Transformer Condition Assessment. Frontiers in Energy Research. 10.10.3389/fenrg.2022.904109.
12. Сташко Василий Иванович, Белицын Игорь Владимирович, Побединский Георгий Александрович АКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ЦИФРОВИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОСЕТЕВЫХ ОБЪЕКТОВ // European research. 2020. №1 (37).
13. Mendoza J., Fernandez P., Morales A., et al. Automated Monitoring Systems for High-Voltage SF6 Breakers // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2020. Vol. 129. Article ID 109911.
14. Chen L., Zhou Q., Huang B., et al. Smart Diagnostic Techniques for Extending the Life of HV Circuit Breakers // IEEE Transactions on Smart Grid. 2021. Vol. 12, No. 4. P. 3612–3623.
15. Kuryanov V.N., Sultanov M.M., Kuryanova E.V., Skopova E.M. Mathematical Model of the Processes of Restoration of Power Equipment in Power Systems by Criterion of the Index of Technical Condition. J. Phys.: Conf. Series. 2020;1683:040241.
16. Виноградов А. В., Лансберг А. А. АНАЛИЗ ПАРКА И ОЦЕНКА КОММУТАЦИОННОГО РЕСУРСА ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ 10 КВ ФИЛИАЛА ПАО "РОССЕТИ ЦЕНТР" - "ОРЕЛЭНЕРГО" // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2022. №5.
17. Балобанов Руслан Николаевич, Булатова Венера Михайловна, Крючков Никита Сергеевич, Шафиков Ильмир Ильдарович ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА СИЛОВЫХ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2024. №4.

Авторы публикации

Балобанов Руслан Николаевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрические станции им В.К. Шибанова», Казанский государственный технический университет, E-mail: rassel_ipek@mail.ru

Латыпова Алсу Алмазовна – инженер ПТО, Филиал АО «Татэнерго» Казанская ТЭЦ-2

References

1. Latypova, A. A. Razrabotka algoritma avtomatizirovannogo rascheta indeksa tekhnicheskogo sostoiianiia elegazovykh vykliuchatelei 110 KV / A. A. Latypova // Nauchnaia deiatelnost v usloviakh tsifrovizatsii: teoreticheskii i prakticheskii aspekty : Sbornik statei Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Ekaterinburg, 01 iunia 2024 goda. – Ufa: OOO "Aeterna", 2024. – S. 46-49.
2. Zhang Y., Wang L., Chen J., et al. Overview of SF6 Circuit Breakers: Development, Diagnosis, and Challenges // IEEE Transactions on Power Delivery. 2019. Vol. 34, No. 2. P. 800–812.
3. Gomes P., Silva R., Santos M., et al. Condition Monitoring of SF6 Circuit Breakers: Parameter Analysis and Practical Implementations // Journal of Electrical Engineering. 2020. Vol. 71, No. 3. P. 245–256.
4. Nazarychev, A. N. Sovershenstvovanie metodiki opredeleniya indeksa tekhnicheskogo sostoyaniya elektrooborudovaniya / A. N. Nazarychev, D. A. Andreev // Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti bol'shih sistem energetiki : v 2-h knigah, Tashkent, 23–27 sentyabrya 2019 goda / Otvetstvennyy redaktor Voropaj N.I.. Tom Kniga 1, Vypusk 70. – Tashkent: Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe uchrezhdenie nauki Institut sistem energetiki im. L.A. Melent'eva Sibirskogo otdeleniya Rossijskoj akademii nauk, 2019. – S. 316-326. – EDN LKPEPR.
5. Jiang X., Li H., Wu Z., et al. Integration of Multiple Sensors for Condition Assessment of High-Voltage Circuit Breakers // Electric Power Systems Research. 2021. Vol. 193. Article ID 106923.
6. Mezin S.V., Blagochinnov A.V., Militoniyana S.H.M., Agrinskaya S.A. Razrabotka novogo podhoda k ocenke tekhnicheskogo sostoyaniya oborudovaniya dlya celej sozdaniya ekspertnykh sistem // Vestnik MEI. 2023. № 4. S. 146—154. DOI: 10.24160/ 1993-6982-2023-4-146-154
7. Hal'yasmaa, A. I. Razrabotka sistemy ocenki tekhnicheskogo sostoyaniya elektrosетеvogo oborudovaniya na osnove nejro-nechetkogo logicheskogo vyvoda: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.14.02 / A. I. Hal'yasmaa. – Ekaterinburg : [b. i.], 2015. – 24 s.
8. Luk'yanov, M. R. Algoritm programmno-tekhnicheskogo kompleksa dlya rascheta indeksa tekhnicheskogo sostoyaniya elektrooborudovaniya i vybora upravlyayushchego vozdeystviya / M. R. Luk'yanov // NAUCHNYE ISSLEDOVANIYA studentov i UCHASHCHIHSYA: sbornik statej Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii v 2 chastyah, Penza, 30 maya 2021 goda. Tom CHast' 1. – Penza: Nauka i Prosveshchenie, 2021. – S. 41-44. – EDN AUFHQI.
9. Liu H., Zhao Y., Wei X., et al. Machine Learning Applications in Condition Monitoring of High Voltage Equipment // IEEE Access. 2018. Vol. 6. P. 41401–41411.
10. Fernandez R., Torres D., Alvarez S., et al. IoT-based Monitoring and Diagnostics for High Voltage Equipment: A Case Study on SF6 Breakers // Energy Informatics. 2022. Vol. 5, No. 1. Article ID 9.
11. Zhang, Xihai & Zhang, Fangfang & Junhe, Wan & Kou, Lei & Ke, Wende. (2022). Review on Evolution of Intelligent Algorithms for Transformer Condition Assessment. Frontiers in Energy Research. 10. 10.3389/fenrg.2022.904109.
12. Stashko Vasilij Ivanovich, Belicyn Igor' Vladimirovich, Pobedinskij Georgij Aleksandrovich AKTUAL'NYE TEKHNologii CIFROVIZACII ELEKTROSETEVYH OB"EKTOV // European research. 2020. №1 (37).
13. Mendoza J., Fernandez P., Morales A., et al. Automated Monitoring Systems for High-Voltage SF6 Breakers // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2020. Vol. 129. Article ID 109911.
14. Chen L., Zhou Q., Huang B., et al. Smart Diagnostic Techniques for Extending the Life of HV Circuit Breakers // IEEE Transactions on Smart Grid. 2021. Vol. 12, No. 4. P. 3612–3623.
15. Kuryanov V.N., Sultanov M.M., Kuryanova E.V., Skopova E.M. Mathematical Model of the Processes of Restoration of Power Equipment in Power Systems by Criterion of the Index of Technical Condition. J. Phys.: Conf. Series. 2020;1683:040241.
16. Vinogradov A. V., Lansberg A. A. ANALIZ PARKA I OCENKA KOMMUTACIONNOGO RESURSA VYKLYUCHATELEJ 10 KV FILIALA PAO "ROSSETI CENTR" - "ORELENERGO" // Izvestiya vuzov. Problemy energetiki. 2022. №5.
17. Balobanov Ruslan Nikolaevich, Bulatova Venera Mihajlovna, Kryuchkov Nikita Sergeevich, SHafikov Il'mir Il'darovich OPTIMIZACIYA SISTEM MONITORINGA SILOVYH KABEL'NYH LINIJ // Izvestiya vuzov. Problemy energetiki. 2024. №4.

Authors of the publication

Ruslan N. Balobanov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. E-mail: rassel_ipek@mail.ru

© Балобанов Р.Н., Латыпова А.А.

Alsu A. Latypova – Branch of JSC «Tatenergo» Kazan CHPP-2, Kazan, Russia. E-mail: alsuu_es@mail.ru

Шифр научной специальности: 2.4.3 Электроэнергетика

Получено

18.09.2024 г.

Отредактировано

02.10.2024 г.

Принято

11.11.2024 г.