



УДК 621.019

[https://doi.org/10.70769/2181-2284.ME.2\(23\).2026.37](https://doi.org/10.70769/2181-2284.ME.2(23).2026.37)

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА КОММУТАЦИОННЫХ АППАРАТОВ

Т.Г. Джаббаров*, С.А. Абдуллаева

Азербайджанский Государственный Университет Нефти и Промышленности, Азербайджан,
Баку, AZ1010 пр-т Азадлыг, 34

*e-mail: tahir.cabbarov@asoiu.edu.az;
tahir1196041@gmail.com

Аннотация. В статье предложена интеллектуальная модель прогнозирования остаточного ресурса высоковольтных выключателей, разработанная для решения проблемы высокой степени износа действующего парка коммутационных аппаратов в современной энергосистеме. В качестве исходных данных модель использует ретроспективную и текущую информацию о фактическом состоянии оборудования, а также сведения об условиях его эксплуатации и режимах работы, что позволяет кардинально повысить достоверность прогнозирования. Представлены результаты интеллектуального анализа данных многофакторной диагностики, который включает в себя комплексную оценку текущего технического состояния выключателя, анализ скорости износа основных узлов и динамику накопления деградиационных изменений. На основе полученных результатов сформирована эффективная методическая поддержка для оперативного и управленческого персонала, минимизирующая риски «человеческого фактора» и существенно повышающая качество планирования объектов, сроков и объемов восстановительных ремонтов. В ходе экспериментов изучены особенности многофакторного изменения параметров оборудования под воздействием эксплуатационных нагрузок, что позволило выполнить обоснованное уточнение оптимальных сроков и объемов последующего мониторинга, сводя к минимуму риски принятия ошибочных технологических решений. В условиях развития энергосистем в направлении интеллектуальных активно-адаптивных сетей (Smart Grid) и стремительного увеличения доли возобновляемых источников энергии, предложенный подход вносит весомый вклад в обеспечение глобальной энергетической безопасности страны.

Ключевые слова: Выключатель, техническое состояние, износ, диагностика, остаточный ресурс, долговечность, интеллектуальная система.

UDC621.019

METHODS FOR IMPROVING THE RELIABILITY OF REMAINING USEFUL LIFE ASSESSMENT OF SWITCHING DEVICES

T.G. Jabbarov *, S.A. Abdullayeva

Azerbaijan State Oil and Industry University, 34 Azadlig Ave., Baku, AZ1010, Azerbaijan

*e-mail: tahir.cabbarov@asoiu.edu.az;
tahir1196041@gmail.com

Abstract. The article proposes an intelligent model for predicting the residual life of high-voltage circuit breakers, developed to address the issue of the high wear rate of the existing fleet of switching devices in modern power systems. As input data, the model utilizes historical and current information on the actual condition of the equipment, as well as data on its operating conditions and modes, which drastically increases forecasting accuracy. The results of data mining of multi-factor diagnostics are presented, including a comprehensive assessment of the current technical condition of the circuit breaker, an analysis of the wear rate of main components, and the dynamics of degradation change accumulation. Based on the obtained results, effective methodological support has been developed for operational and management personnel, minimizing the risks of the "human factor" and significantly improving the quality of planning for targets, schedules, and volumes of restorative maintenance. During the experiments, the features of multi-factor changes



in equipment parameters under the influence of operating loads were studied, which allowed for a well-founded refinement of the optimal timing and scope of subsequent monitoring, minimizing the risks of making erroneous technological decisions. In the context of power system development towards smart actively-adaptive grids (Smart Grid) and a rapid increase in the share of renewable energy sources, the proposed approach makes a significant contribution to ensuring the global energy security of the country.

Key words: *Circuit breaker, technical condition, wear, diagnostics, remaining useful life (RUL), durability, intelligent system.*

Введение

Острота проблемы управления эксплуатацией электрооборудования продиктована двумя встречными факторами: прогрессирующим старением парка коммутационных аппаратов, выработавших свой нормативный срок, и жесткими требованиями к оптимизации эксплуатационных затрат. Существующая *система технического обслуживания* (СТО) представляет собой комплекс организационно-технических регламентов, нацеленных на пресечение преждевременного износа, своевременную локализацию дефектов и обеспечение безопасной эксплуатации. Главный вектор эволюции таких систем сегодня — это стратегический переход от жесткого *планово-предупредительного ремонта* (ППР) к гибкому обслуживанию по фактическому техническому состоянию (динамическому риск-ориентированному подходу). Это позволяет предупреждать отказы, повышать надежность оборудования и минимизировать издержки на ликвидацию аварий.

Реализация этого перехода невозможна без качественной модернизации автоматизированных информационных систем и внедрения новых методов непрерывного контроля. Инженерному персоналу необходима сквозная информационно-методическая поддержка, базирующаяся на синергии разнородных данных:

- совместного анализа ретроспективных и текущих параметров работы оборудования в реальных эксплуатационных и режимных условиях;
- детальной фиксации всех событий, включая уточненную классификацию первопричин отказов, оценку масштаба повреждений и определение вызванного ими экономического ущерба;
- непрерывного повышения полноты и достоверности поступающей информации.

Ключевым преимуществом такой интеллектуальной экосистемы становится *максимальное уменьшение субъективного («человеческого») фактора* при оценке технического состояния оборудования, что сводит к минимуму риск ошибочных решений со стороны эксплуатационного персонала.

На начальном этапе эксплуатационного цикла однотипное коммутационное оборудование обладает практически идентичным исходным значением механического и коммутационного ресурса. Однако в процессе эксплуатации ухудшение их технических характеристик протекает неравномерно, что неизбежно ведет к индивидуальному снижению надежности каждого аппарата. Внедрение интеллектуальной оценки остаточного ресурса высоковольтных выключателей позволяет нивелировать этот фактор неопределенности, трансформируя это оборудование в полностью прогнозируемые и контролируемые активы [3].

Методы и материалы

Основная цель создания интеллектуальной информационной системы заключается в возможности предотвращения отказов высоковольтных выключателей на основе мониторинга их фактического технического состояния. Чтобы сложность системы не снижала её общую эксплуатационную надёжность, её структурная реализация должна оставаться максимально лаконичной [1]. Разработанная для оперативно-технического персонала интеллектуальная информационная система базируется на едином информационно-техническом обеспечении, которое учитывает специфику работы оборудования и объединяет несколько взаимосвязанных программных подсистем [2].

Ключевой функционал системы включает:



- сбор и систематизацию (кодирование) сведений о техническом состоянии электроустановок;
- контроль достоверности входящей информации;
- диалоговый режим работы посредством структурированных основных и вспомогательных меню в режиме реального времени;
- расчет и углубленный анализ показателей эксплуатационной надежности с последующей визуализацией результатов;
- выработку рекомендаций для увеличения остаточного срока службы оборудования.

Практическое внедрение данных программных комплексов позволяет сформировать единую информационную базу данных, эффективно решать задачи управления техническим состоянием коммутационных аппаратов и качественно повышать общую культуру производства.

Интеграция интеллектуальной системы в решение задач управления обеспечивает:

- оптимизацию ТОиР – снижение затрат на техническое обслуживание и ремонты, сокращение их длительности и повышение качества ремонта за счет перехода к ремонтам по фактическому состоянию;
- снижение аварийности – минимизацию рисков возникновения аварий путем раннего выявления и блокирования развивающихся дефектов;
- повышение готовности – сокращение частоты и продолжительности вынужденных простоев оборудования, связанных с аварийно-восстановительными работами;
- рост эффективности – увеличение производительности труда персонала и повышение общей культуры обслуживания энергообъектов.

Современный контур обслуживания, наряду с традиционными периодическими профилактическими испытаниями, предполагает внедрение специализированных стационарных или переносных систем контроля технического состояния. При выборе технического решения важно учитывать экономические и эксплуатационные критерии:

- *Стационарный (непрерывный) мониторинг:* из-за высокой капиталоемкости и значительной стоимости оборудования такие системы разворачиваются преимущественно на критически важных и особо ответственных выключателях.
- *Переносные (мобильные) системы диагностики:* их применение становится экономически и технически обоснованным в тех случаях, когда прогнозируемая длительность безотказной работы выключателя оказывается меньше, чем оставшийся интервал до планового межремонтного обслуживания.

В связи с этим перед техническими службами встает актуальная практическая задача: разработка четких критериев и формирование перечня выключателей, для которых непрерывный контроль коммутационной способности с помощью именно переносных систем контроля является наиболее целесообразным.

Остаточный ресурс высоковольтных коммутационных аппаратов представляет собой комплексный многомерный показатель, оценка которого осуществляется по трем ключевым функциональным показателям:

- *Коммутационный ресурс-* определяется не только эквивалентным количеством операционных циклов, но и интегральной тяжестью коммутационных режимов, включая число отключений токов короткого замыкания (КЗ) и тип нагрузки.
- *Механический ресурс-* рассчитывается на основе сопоставления фактического числа выполненных циклов «включение-отключение» (ВО) с паспортными нормативными значениями механической стойкости привода и кинематических звеньев.
- *Диэлектрический ресурс:* оценивается по результатам непрерывного или периодического мониторинга состояния изоляционных конструкций, интенсивности эрозии межконтактных промежутков, физико-химических параметров элегаза **SF₆** и уровня активности *частичных разрядов* (ЧР).



Переход к оценке остаточного ресурса на основе данных о техническом состоянии знаменует собой новый подход в управлении критической сетевой инфраструктурой. Данная концепция переводит принятие управленческих решений на строгий Data-driven подход, обеспечивая тем самым гарантированную надежность и бесперебойность энергоснабжения потребителей.

Особое внимание в работе уделено количественной оценке *показателей долговечности* (ПД) узлов и конструктивных элементов коммутационных аппаратов, износ которых носит выраженный дискретный характер и обусловлен дискретными эксплуатационными воздействиями. Полученные количественные оценки обладают высокой самостоятельной научно-практической ценностью, поскольку позволяют проверить и подтвердить текущую степень износа и оценить время безотказной работы оборудования [3].

Учитывая стохастическую (случайную) природу дискретных эксплуатационных воздействий, разработанные модели адаптированы для применения в алгоритмах имитационного моделирования процессов износа, что необходимо для подтверждения точности и чувствительности оцениваемых показателей [4].

В рамках исследования методология оценки показателей долговечности формализована применительно к ряду базовых моделей износа [5]:

Модель 1. Детерминированный поток воздействий

Рассматривается регулярный поток воздействий с заранее известными фиксированными интервалами времени между ними (Δt). Если установлено предельно допустимое число таких детерминированных воздействий $N_{\text{доп.}}$, то расчетная величина накопленного износа оборудования к моменту времени t определяется как:

$$I_z(t) = \delta N(t) = \frac{t}{\Delta t \cdot N_{\text{доп.}}}$$

При этом величина остаточного ресурса $Re(t) = 1 - I_z(t)$, а интервал времени до предстоящего планового ремонта – произведению ($\Delta t \cdot N_{\text{доп.}}$).

Модель 2. Случайный (пуассоновский) поток воздействий

В условиях случайного характера воздействия на эксплуатационный процесс описывается однородным пуассоновским потоком, который характеризуется стационарностью, ординарностью и отсутствием последствия. Вероятность того, что за время t оборудование подвергнется ровно N воздействиям, определяется по формуле:

$$P(N, t) = \frac{(wt)^N}{N!} e^{-wt} \quad (1)$$

В свою очередь, функция распределения вероятности износа величиной N_t принимает следующий вид:

$$P(N_t \leq N) = F_N(N, t) = \sum_{i=1}^N P(i, t) \quad (2)$$

Расчет показателей долговечности этой модели вычисляются следующим образом:

- средний износ:

$$M^*[I_z(t)] = M^*(\delta N) = \frac{w^* t}{N_{\text{доп.}}}, \quad (3)$$

где w^* - оценка интенсивности воздействия;

- остаточный ресурс $Re(t)$: значение $Re(t)$ определяется аналогично детерминированному подходу (см. п. 1). При этом функция распределения вероятностей для остаточного ресурса принимает вид:

$$F[Re(t)] = 1 - F[I_z(t)]$$

- прогнозный межремонтный интервал (T_d), расчетное время, остающееся до очередного планового вывода оборудования в ремонт, определяется соотношениями:

- среднее значение

$$M^*(T_d) = \frac{N_{\text{доп.}}}{w^*} \quad (4)$$

- нижнее и верхнее граничные значения доверительного интервала рассчитываются соответственно, как:



$$\frac{T_{d,(1-R)}}{T_{d,(1-R)}} = \frac{N_{\text{доп}}}{W_R}$$
$$\frac{T_{d,(1-R)}}{T_{d,(1-R)}} = \frac{N_{\text{доп}}}{w_{(1-R)}}$$

Алгоритм расчета показателей долговечности

Последовательность алгоритма расчета при оценке показателей долговечности коммутационного оборудования формализуется следующим образом [6]:

1. Выполняется измерение текущих значений диагностических показателей оборудования в фиксированный момент времени t_k . Мониторинг осуществляется через эксплуатационный интервал времени $\Delta t = t_k - t_p$, где t_p - момент завершения последнего ремонта. С математической точки зрения, увеличение интервала Δt пропорционально повышает число зафиксированных воздействий N , что существенно минимизирует погрешность при расчете среднего удельного износа, приходящегося на одно коммутационное воздействие в течение заданного срока службы элемента. Для обеспечения требуемой точности расчета выборки, величину Δt рекомендуется выбирать таким образом, чтобы число зафиксированных за этот период воздействий составляло $N_0(\Delta t) = (0,4-0,6)N_{\text{доп}}$.

2. Производится расчет индивидуальной величины накопленного износа для каждого контролируемого диагностического показателя:

$$Iz(P_i, t_k) = \frac{P_i(t_k) - P_i(t_p)}{P_{\text{доп}} - P_0}, \quad (5)$$

где P_0 – исходное значение i -го диагностического показателя.

3. Рассчитывается точное количество единичных воздействий (коммутационных циклов), зарегистрированных на анализируемом временном интервале Δt_n

$$N_0(\Delta t) = \sum_{i=1}^n \frac{N_{0,i}(\Delta t)}{\mu_{1,i}}, \quad (6)$$

где $N_{0,i}(\Delta t)$ – наблюдаемое за интервал времени Δt число воздействий i -го типа; n – число однотипных воздействий; $\mu_{1,i}$ – относительная тяжесть воздействия, равная отношению $N_{\text{доп}}/N_{\text{доп},i}$; $N_{\text{доп},i}$ - допустимое число воздействий i -го типа.

4. Вычисляется средняя величина изменения износа, приходящаяся на одно единичное воздействие, по следующей зависимости:

$$\Delta Iz(P_i, t_k) = \frac{Iz(P_i, t_k)}{N_0(\Delta t)} \quad (7)$$

5. Определяется предельно допустимое количество единичных воздействий на узел до перехода в предельное состояние. ($N_{\text{доп},i}$):

$$N_{\text{доп},i}^* = \frac{1}{\Delta Iz(P_i, t_k)}; \quad (8)$$

где $i=1, n$, n – число показателей.

6. Для каждого ДП определяется величина остаточного ресурса, выраженная в количестве оставшихся элементарных воздействий.

$$Re(N_i) = \frac{N_{\text{доп},i} - N_0(\Delta t)}{N_{\text{доп},i}^*} \quad (9)$$

7. Определяется остаточный ресурс оборудования исходя из условия:

$$Re(N) = \min [Re(N_1), Re(N_2), \dots, Re(N_n)] \quad (10)$$

Результаты

Практическое внедрение разработанных программных комплексов позволяет сформировать единую информационную базу данных и эффективно решать задачи управления техническим состоянием коммутационных аппаратов. Наиболее эффективным методом повышения эксплуатационной надежности выключателей является совершенствование системы их *технического обслуживания и ремонта* (ТОиР), в частности — переход к ремонтам по фактическому техническому состоянию. Текущее состояние оборудования определяется на основе измеряемых *диагностических показателей* (ДП),



характеризующих электрические, тепловые, механические и иные свойства отдельных узлов выключателей.

В традиционном подходе результаты измерений ДП сопоставляются с регламентированными нормативными уставками, после чего формируется заключение о соответствии или несоответствии технического состояния выключателей предъявляемым требованиям. Однако такой экспресс-анализ не позволяет гарантировать безотказность выключателя в течение предстоящего межремонтного интервала, поскольку он не учитывает показатели долговечности: остаточный коммутационный и механический ресурс, остаточный срок службы, а также непревышение длительности межремонтного периода. Остаточный износ в течение срока службы конструктивного элемента прямо пропорционален общему числу перенесенных коммутационных воздействий и степени их «тяжести» (амплитуде отключаемых токов короткого замыкания, характеру нагрузки и т.д.).

При однотипном воздействии на оборудование принято различать три ключевые разновидности (модели) износных процессов. Опыт эксплуатации свидетельствует, что *стабильная (постоянная) скорость изменения износа* элементов выключателя характерна для элементов, пока значения ДП находятся в пределах регламентированных заводом-изготовителем предельных значений. Однако для ряда ДП фиксируется уменьшение величины приращения износа. В этом случае износ от каждого последующего дискретного воздействия $\Delta Iz(t_2)$ оказывается меньше, чем от предыдущего воздействия $\Delta Iz(t_1)$, где t_1 и t_2 - моменты времени возникновения последовательных дискретных воздействий, $t_2 > t_1$. Это объясняется способностью «приспосабливаться» к условиям работы и проявляется, как правило, после плановых ремонтов.

Наиболее опасны для оборудования условия, когда износ каждого последующего воздействия превышает износ от предыдущего воздействия, т.е. приращение износа возрастает $\Delta Iz(t_1) < \Delta Iz(t_2)$, где $t_2 > t_1$. Данный деструктивный процесс классифицируется как *катастрофический износ*. Он активизируется при эксплуатации выключателей, чье техническое состояние признано неудовлетворительным из-за выхода диагностических показателей за пределы нормативных допусков.

В этих условиях накопление остаточного износа необратимо снижает фактический запас прочности оборудования — его реальное располагаемое число воздействий $N_{\text{доп}}$. Как следствие, любое последующее коммутационное воздействие лишь ускоряет износ, увеличивая вероятность аварийного повреждения как отдельных конструктивных элементов, так и выключателя в целом. Из этого следует важный практический вывод: если срок службы оборудования приближается к расчетному лимиту ($T_{\text{доп.р}}$), или уже превысил его, то оценка технического состояния, опирающаяся лишь на критерий непревышения номинального числа воздействий (приведенных к единичному повреждению) допустимой величины $N_{\text{доп}}$, становится неуместной и бесполезной. Дальнейшая эксплуатация по такой упрощенной схеме неизбежно приведет к резкому росту интенсивности отказов.

Обсуждение

Интеграция разработанной интеллектуальной системы в контур управления обеспечивает комплексный синергетический эффект. Выделяются две основные категории выгоды:

1. Применение непрерывного мониторинга позволяет регистрировать латентные (скрытые) отклонения в работе аппаратов, обеспечивая прогнозирование и предотвращение *до 90% внезапных отказов*. Это исключает существенные финансовые потери, обусловленные аварийными ситуациями и вынужденными простоями сетевой инфраструктуры.

2. Помимо снижения аварийности, непрерывная диагностика формирует комплекс скрытых экономических эффектов, позволяющих оптимизировать как текущие операционные расходы (ОРЕХ), так и долгосрочные инвестиции (CAPEX):

Переход к обслуживанию по фактическому техническому состоянию. Это обеспечивает прямую экономию на стоимости расходных материалов, сокращает



трудозатраты ремонтных бригад и, главное, сводит к минимуму вынужденные простои оборудования.

Прогнозирование надежности. Система позволяет моделировать различные сценарии сетевых нагрузок и аварийных режимов. Такой подход дает возможность обнаружить скрытые дефекты и «слабые звенья» в конструкции задолго до того, как они приведут к реальному отказу.

Стратегическое управление инвестициями (CAPEX). Объективные данные о степени износа каждого конкретного выключателя позволяют точно представлять, какие выключатели требуют немедленной замены, а какие способны прослужить еще несколько лет. Это исключает преждевременные траты и гарантирует целевое распределение бюджета.

Рационализация складских запасов. Четкое понимание динамики износа позволяет точно прогнозировать потребность в запасных частях, инструментах и принадлежностях. В результате отпадает необходимость замораживать оборотные средства в избыточных запасах «на всякий случай».

Увеличение срока службы оборудования. Своевременное устранение мелких неисправностей в сочетании с щадящим режимом работы, существенно замедляет естественный износ узлов, продлевая общий срок службы выключателей на 15-20%.

3. Система непрерывной диагностики выводит управление парком оборудования на принципиально новый уровень. Формируя защищенную информационную среду, этот подход закладывает технологический фундамент для создания интеллектуальных и самовосстанавливающихся энергосетей будущего (Smart Grid).

4. Своевременный контроль и предсказуемость работы каждого узла гарантируют высокую эффективность, гибкость и устойчивость энергосистемы, снижают риски системных аварий.

Заключение

1. Методическая поддержка для оперативного персонала играет решающую роль в цифровизации процессов обслуживания высоковольтных выключателей. Данный подход минимизирует вероятность принятия ошибочных решений при оценке технического состояния оборудования, существенно снижает операционные затраты и гарантирует высокую надежность энергосистемы. Практическая ценность методической поддержки выражается в виде структурированных рекомендаций, которые включают:

- выявление «слабых звеньев» в конструкции выключателей и определение основных факторов ухудшения технического состояния;
- объективный анализ качества восстановления износа и повышения остаточного ресурса по результатам проведения планово-восстановительных ремонтов.

2. Предложена методология и расчетный алгоритм, позволяющие осуществлять оценку остаточного ресурса высоковольтных выключателей на основе динамики изменения диагностических показателей.

3. Разработан метод планирования сроков и объемов восстановления износа. В основу метода положена комплексная оценка интегрального показателя состояния оборудования, объединяющего базовые критерии эксплуатационной надежности и технико-экономической эффективности высоковольтных выключателей. Предложенный подход открывает широкие возможности для ранжирования коммутационных аппаратов. Применение математических методов кластеризации позволяет дифференцировать контролируемый парк оборудования на четыре группы:

- выключатели, требующие немедленного вывода из работы для аварийно-восстановительных ремонтов (*критический приоритет - экстренное вмешательство*);
- аппараты, рекомендуемые к выводу в ремонт по внеочередной аварийной заявке для устранения выявленных дефектов (*высокий приоритет - аварийное реагирование*);



- оборудование, подлежащее дооснащению мобильными (переносными) системами непрерывного контроля технического состояния в режиме реального времени (*средний приоритет - упреждающий мониторинг*);
- выключатели, функционирующие в пределах нормы диагностических показателей и не требующие специальных мероприятий по восстановлению ресурса (*штатный режим - стабильное состояние*).

Литература

1. Фархадзаде, Э.М., Мурадалиев, А.З., Рафиева, Т.К. Учет остаточного износа конструктивных материалов электрооборудования. Баку, *Экоэнергетика*, No. 1, 2006, с. 22-24.
2. Рафиева, Т.К., Абдуллаева, С.А. Автоматизированный контроль технического состояния выключателей распределительных устройств энергосистемы. *Международный научный семинар им. Ю.Н. Руденко*. Методические вопросы исследования надёжности больших систем энергетики, Вып. 63, Баку, 2013, с. 506-513.
3. Мурадалиев, А.З., Рафиева, Т.К., Абдуллаева, С.А. Метод оценки целесообразности непрерывной диагностики технического состояния высоковольтных выключателей. *Материалы международной научной конференции*, Современные научно-технические и прикладные проблемы энергетики, Сумгаит, 2015, с. 14-18.
4. Ситников, В.Ф., Скопинцев, В.А. Вероятностно-статистический подход к оценке ресурсов электросетевого оборудования в процессе эксплуатации. *Электричество*, No. 11, 2007, с. 32-38.
5. Сафарова, Т.Х., Абдуллаева, С.А. Модели для оценки остаточного ресурса выключателей. Баку, *Проблемы Энергетики*, No. 2-3, 2008, с. 38-41.
6. Фархадзаде, Э.М., Абдуллаева, С.А. Модели для оценки показателей долговечности элементов электроустановок при дискретных воздействиях. *Международный конгресс Энергетика. Экология. Экономика*, Баку, 2007, с. 45-51.