

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ/ELECTRICAL COMPLEXES AND SYSTEMS

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.56> EDN: XNPQNW**ДЕТЕРМИНАНТНЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ОСТАТОЧНОГО КОММУТАЦИОННОГО РЕСУРСА
ВАКУУМНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 6–10 КВ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В УСТРОЙСТВАХ
ПРЕДИКТИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ**

Научная статья

Косорлуков И.А.¹, Соловьев А.В.², Ахметов Р.Р.^{3,*}, Строчков А.В.⁴, Алфеев Д.А.⁵¹ ORCID : 0009-0000-9247-6193;² ORCID : 0009-0006-1868-238X;³ ORCID : 0009-0000-9106-0444;⁴ ORCID : 0009-0002-5843-6790;⁵ ORCID : 0009-0009-6645-0278;^{1, 2, 3, 4} Самарский государственный технический университет, Самара, Российская Федерация⁵ Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (rinataxm[at]mail.ru)

Предложена: 13.05.2026; Принята: 22.07.2026; Опубликовано: 17.08.2026

Аннотация

В настоящей публикации рассматривается метод вычисления коммутационного ресурса вакуумных выключателей класса напряжения 6–10 кВ на основе детерминантного подхода. Выполнен анализ устройств предиктивной диагностики и применяемых ими способов прогнозирования коммутационного ресурса. В ходе детального изучения предлагаемого метода прогнозирования ресурса вакуумного выключателя исследованы физические процессы деградации контактов, влияние эксплуатационных режимов работы сети, а также воздействие устройств защиты на развитие аномалий в контактной паре выключателя. В соответствии с руководством по эксплуатации сформулированы критерии оценки достижения критических состояний, ограничивающих дальнейшую эксплуатацию вакуумного выключателя. Раскрыт физический смысл детерминантного подхода при определении остаточного ресурса выключателя выбранным устройством предиктивной диагностики. Установлено влияние детерминантного коэффициента на результат вычисления остаточного ресурса. Получено выражение для определения остаточного коммутационного ресурса с учётом влияния предшествующих коммутаций. Предложена методика коррекции параметра остаточного ресурса на основе данных испытаний выключателя. Разработан метод формирования сигналов к проведению профилактических мероприятий и ограничению тока нагрузки в процессе эксплуатации. Выполнено компьютерное моделирование метода с использованием номинальных данных серийно выпускаемого вакуумного выключателя, а также проведено сравнение полученных результатов с заводскими экспериментальными характеристиками расхода коммутационного ресурса.

Ключевые слова: вакуумный выключатель, коммутационный ресурс, детерминантный коэффициент, коммутационные аппараты, предиктивный анализ, устройство мониторинга.

**DETERMINANT APPROACH TO ASSESSING THE REMAINING SWITCHING LIFE OF 6–10 KV VACUUM
CIRCUIT BREAKERS FOR USE IN PREDICTIVE DIAGNOSTIC DEVICES**

Research article

Kosorlukov I.A.¹, Solovlev A.V.², Ahmetov R.R.^{3,*}, Strochkov A.V.⁴, Alfeev D.A.⁵¹ ORCID : 0009-0000-9247-6193;² ORCID : 0009-0006-1868-238X;³ ORCID : 0009-0000-9106-0444;⁴ ORCID : 0009-0002-5843-6790;⁵ ORCID : 0009-0009-6645-0278;^{1, 2, 3, 4} Samara State Technical University, Samara, Russian Federation⁵ National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russian Federation

* Corresponding author (rinataxm[at]mail.ru)

Suggested: 13.05.2026; Accepted: 22.07.2026; Published: 17.08.2026

Abstract

This publication discusses a method for calculating the switching life of vacuum circuit breakers of voltage class 6-10 kV based on a determinant approach. The analysis of predictive diagnostic devices and the methods used by them to predict the switching resource is performed. In the course of a detailed study of the proposed method for predicting the life of a vacuum circuit breaker, the physical processes of contact degradation, the effect of network operating modes, as well as the effect of protection devices on the development of anomalies in the contact pair of the circuit breaker were investigated. In accordance with the operating instructions, criteria for assessing the achievement of critical conditions limiting the further operation of the vacuum circuit breaker are formulated. The physical meaning of the determinant approach in determining the residual life of

the switch by the selected predictive diagnostic device is revealed. The influence of the determinant coefficient on the result of calculating the residual resource has been established. An expression is obtained for determining the residual switching resource, taking into account the influence of previous switching operations. A method for correcting the residual resource parameter based on the test data of the switch is proposed. A method for generating signals for preventive measures and limiting load current during operation has been developed. A computer simulation of the method was performed using the nominal data of a commercially available vacuum circuit breaker, and the results were compared with the factory experimental characteristics of the switching resource consumption.

Keywords: vacuum circuit breaker, switching resource, determinant coefficient, switching devices, predictive analysis, monitoring device.

Введение

Одним из ключевых факторов, определяющих надежность электроэнергетических систем, является исправность коммутационного оборудования, в частности вакуумных выключателей (ВВ) среднего напряжения. Их ресурс исчерпывается в процессе эксплуатации вследствие износа контактов, деградации вакуумной дугогасящей камеры и других компонентов. Точное определение остаточного ресурса позволяет оптимизировать графики технического обслуживания, предотвращать аварийные отключения и снижать эксплуатационные расходы.

Основным показателем текущего состояния вакуумных выключателей принято считать показатель остаточного или израсходованного ресурса выключателя. При этом точность и многокритериальность методов его определения являются основой правильной интерпретации и принятия решений на его основе. В контексте прогнозирования остаточного ресурса ВВ устройствами предиктивной диагностики применяются различные подходы, начиная от статистических оценок, основанных на анализе исторических данных об отказах оборудования, и заканчивая сложными моделями, учитывающими физические процессы износа. Статистические методы, как правило, просты в реализации, но ограничены своей способностью учитывать индивидуальные особенности каждого конкретного выключателя и условия его эксплуатации. Более продвинутые модели, напротив, требуют значительных вычислительных ресурсов и точных данных о параметрах работы оборудования, но позволяют с большей точностью предсказать момент времени, когда потребуется замена или ремонт ВВ.

Статья раскрывает практический способ корректировки прогнозируемого расхода ресурса вакуумных выключателей и демонстрирует адаптацию метода к работе в составе устройства «МАРС», методику получения сигналов, позволяющих своевременно планировать профилактические мероприятия.

Обзор методов и устройств определения текущего ресурса выключателей

Анализ существующих методов оценки остаточного коммутационного ресурса выключателей [1] демонстрирует разнообразие используемых критериев и, как следствие, вариативность полученных результатов при применении различных математических моделей. Такие методы применяются как в устройствах мониторинга состояния выключателей, так и интегрируются в устройства релейной защиты и автоматики.

В частности, метод, изложенный в руководстве [2], основанный на измерении действующего значения тока, и применяется в блоке микропроцессорной релейной защиты БМРЗ-50 ООО «НТЦ "Механотроника"», г. Санкт-Петербург [3], внешний вид которого представлен на рисунке 1. Аналогичный метод с некоторой корреляцией реализован в цифровом устройстве релейной защиты и автоматики серии «Атлас-231» ПК «Электрум», г. Самара (рис. 2) [4].



Рисунок 1 - Внешний вид микропроцессорной релейной защиты БМР3-50
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.56.1>



Рисунок 2 - Внешний вид цифрового устройства релейной защиты и автоматики серии «Атлас-231» (вид с торца)
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.56.2>

В регистраторе коммутационного ресурса выключателя «РЕСУРС-1» НП «Прикладная автоматика», г. Екатеринбург [5] (рис. 3) применяется методика определения износа контактов выключателя, основанная на вычислении интеграла Джоуля на интервале времени горения дуги, аналогичные методы изложены в работах [6], [7].



Рисунок 3 - Внешний вид регистратора коммутационного ресурса выключателя «РЕСУРС-1»
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.56.3>

В рамках научных исследований кафедры АЭЭС СамГТУ был создан прототип модуля анализа ресурса «МАРС» (рис. 4), защищённый патентом [8]. Устройство реализует альтернативный метод расчёта [9], использующий детерминантный подход.



Рисунок 4 - Внешний вид модуля анализа ресурса «МАРС»
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.56.4>

Важно отметить, что вследствие нехватки статистических данных эксплуатации и ограниченного времени наблюдения систем мониторинга, верификация существующих методов оценки ресурса невозможна; единственным экспериментальным базисом служат заводские испытания коммутационной способности, однако условия проведения экспериментов не раскрыты – в частности, неизвестны температура контактов при коммутации, длительность протекания сверхтоков и иные значимые факторы износа.

Зависимость расхода коммутационного ресурса BB TER_VCB15_LD8_F от действующего значения представлена на рисунке 5 [10].

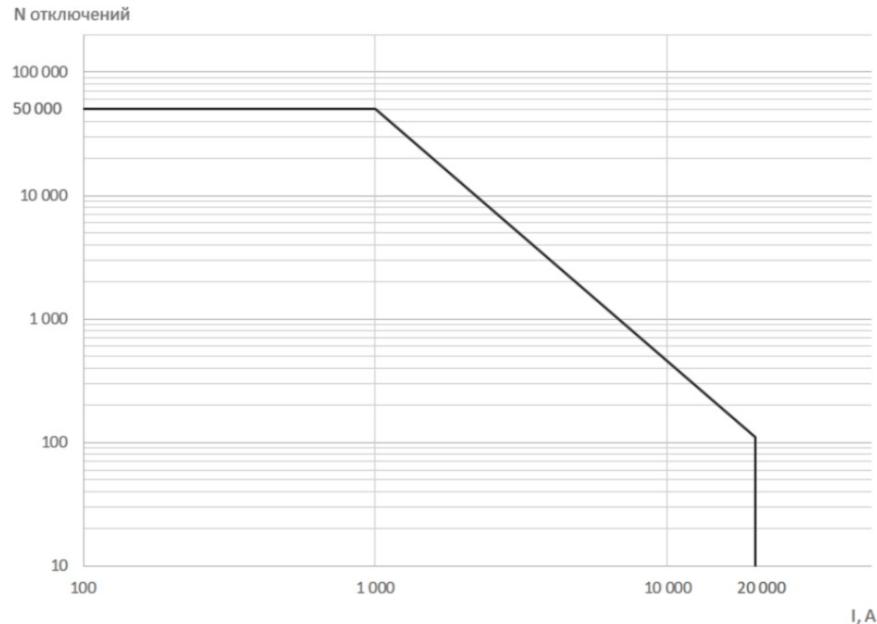


Рисунок 5 - Экспериментальная зависимость расхода коммутационного ресурса BB TER_VCB15_LD8_F от действующего значения тока отключения
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.56.5>

Если рассмотреть зависимость, представленную на рисунке 5, можно прийти к выводу, что метод производителя опирается на данные испытаний лишь в критических точках и не отражает реальный износ при множественных коммутациях с разными токами; промежуточные значения получены линейной интерполяцией на логарифмической шкале.

Учитывая все недостатки метода, предлагаемого производителем, он является единственным экспериментально подтверждённым способом определения расхода коммутационного ресурса при единичной коммутации. При этом метод не учитывает изменение состояния контактной пары при множестве последовательных коммутациях при различных токах отключения и не имеет детерминантных свойств.

Теоретическое исследование

Основой разработанного метода является способ, рассмотренный в работе [9], который можно выразить в количестве сработанных коммутаций при отключении выключателя при коротких замыканиях (КЗ), тогда выражение принимает вид:

$$N_{\text{сраб.}i} = N_{\text{ном.}} \times \frac{r_{\text{к.}i}}{r_{\text{к.ном.}}} \times \frac{I_i^2 t_{\text{КЗ.}i}}{I_{\text{ном.откл.}}^2 t_T} \times \left(\frac{I_i - I_{\text{ном.}}}{I_{\text{ном.откл.}} - I_{\text{ном.}}} \right)^2, \quad (1)$$

где $N_{\text{сраб.}i}$ – сработанный ресурс выключателя на i -ом отключении выключателя при КЗ, *коммутаций*; $N_{\text{ном.}}$ – номинальный ресурс выключателя при номинальном токе, *коммутаций*; $r_{\text{к.}i}$ – фактическое сопротивление контактов выключателя на i -ой коммутации, Ом; $r_{\text{к.ном.}}$ – номинальное сопротивление контактов выключателя, Ом; I_i – действующее значение тока КЗ при отключении выключателя, А; $t_{\text{КЗ.}i}$ – полное время протекания тока КЗ на i -ом отключении выключателя, с; $I_{\text{ном.}}$ – номинальный ток выключателя, А; $I_{\text{ном.откл.}}$ – номинальный ток отключения выключателя, А; t_T – номинальное время термической стойкости выключателя, с.

Следует учитывать, что остаточный ресурс после i -ой коммутации необходимо определять пошагово, от раннего отключения к последней коммутации. Для учёта механического ресурса, который расходуется при каждой коммутации, и перехода к целочисленным значениям, округлим $N_{\text{сраб.}i}$ до целого числа вверх. Тогда остаточный коммутационный ресурс выключателя после i -ой коммутации определяется по выражению:

$$N_{\text{ост.}i} = N_{\text{ост.}i-1} - \left\lceil N_{\text{ном.}} \times \frac{r_{\text{к.}i}}{r_{\text{к.ном.}}} \times \frac{I_i^2 t_{\text{КЗ.}i}}{I_{\text{ном.откл.}}^2 t_T} \times \left(\frac{I_i - I_{\text{ном.}}}{I_{\text{ном.откл.}} - I_{\text{ном.}}} \right)^2 \right\rceil, \quad (2)$$

где $N_{ост.i}$ – остаточный коммутационный ресурс выключателя на i -ой коммутации, коммутаций.

Заменяя составляющие выражения (2) на произведение коэффициентов, формула принимает вид:

$$N_{сраб.i} = N_{ост.i-1} - [N_{ном.} k_{r,i} k_{T,i} k_{I,i}], \quad (3)$$

где $k_{r,i} = r_{k,i} / r_{к.ном.}$ – коэффициент сопротивления контактов на i -ой коммутации, о.е.; $k_{T,i} = (I_i^2 t_{K3,i}) / (I_{ном.отк.}^2 t_T)$ – коэффициент термического воздействия на i -ой коммутации, о.е.; $k_{I,i} = ((I_i - I_{ном}) / (I_{ном.отк.} - I_{ном}))^2$ – коэффициент действующего значения тока на i -ой коммутации, о.е.

Коэффициент действующего значения тока отображает зависимость действующего значения тока на общий ресурс выключателя, определяя усреднённое влияние действующего значения тока на состояние аппарата. Поэтому совместное применение коэффициентов $k_{T,i}$ и $k_{I,i}$ позволяет уточнить выражение для поиска более надёжного способа определения коммутационного ресурса выключателя.

Коэффициент $k_{I,i}$ учитывает влияние дугового процесса на износ контактов выключателя вследствие эрозии контактных поверхностей. Процесс коммутации тока КЗ сопровождается образованием вакуумной дуги, при которой металл с поверхности контактов испаряется, что приводит к потере материала и постепенному износу контактов. Износ контактов уменьшает контактное давление, снижая способность контактов противостоять электродинамическим силам, и ограничивает способность ВВ выдерживать кратковременные и пиковые токи.

На рисунке 6 представлено графическое представление коэффициента действующего значения тока в зависимости от отношения действующего значения тока отключения к его номинальному току.

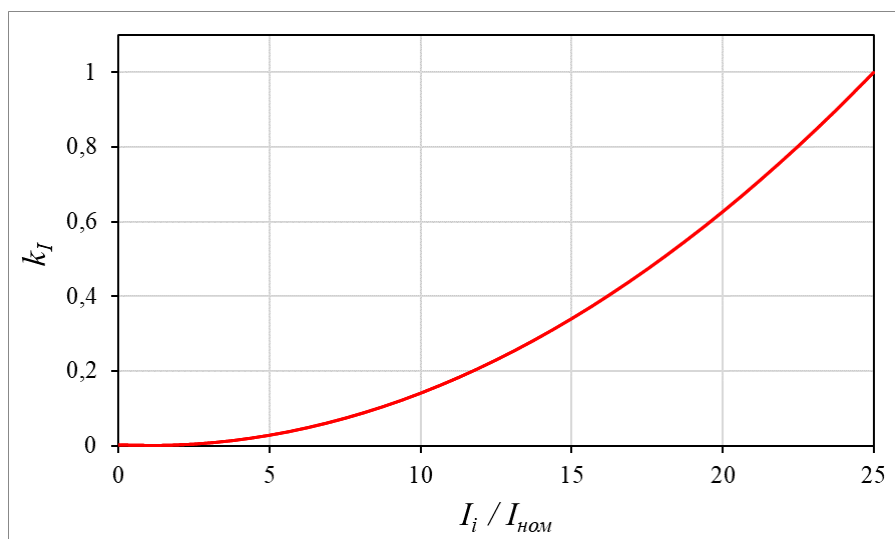


Рисунок 6 - Зависимость действующего значения тока от отношения тока короткого замыкания к номинальному току

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.56.6>

Коэффициент $k_{T,i}$ определяет термическое воздействие на выключатель, и зависит не только от действующего значения протекающего тока, но и от времени его воздействия. При термическом воздействии токов КЗ может возникнуть эффект холодной сварки, который приводит к повышенному износу контактной пары при размыкании. К тому же при воздействии температур выше допустимой (номинальной) увеличивается деградация элементов выключателя и снижается срок его эксплуатации.

По сути, $k_{T,i}$ – это отношение интеграла Джоуля тока КЗ к термической стойкости выключателя, и при наличии осциллографических данных устройства мониторинга значение коэффициента определяется по выражению:

$$k_T = \frac{\sum_{p=0}^b I_{изм.p}^2 \Delta t_p}{I_{ном.отк.}^2 t_T}, \quad (4)$$

где p – номер измерения тока; b – количество измерений тока; $I_{изм.p}$ – p -ое значение измеренного тока, А; Δt_p – время между $(p-1)$ и p измерениями тока, с.

При отсутствии данных параметрического мониторинга допустимо применить действующее значение тока для примерного расчета численного значения интеграла Джоуля. Зависимость коэффициента термического воздействия на выключатель при значениях тока от 0 до $I_{ном.откл.} = 20$ кА при времени термической стойкости 3 с, изображена на рисунке 7.

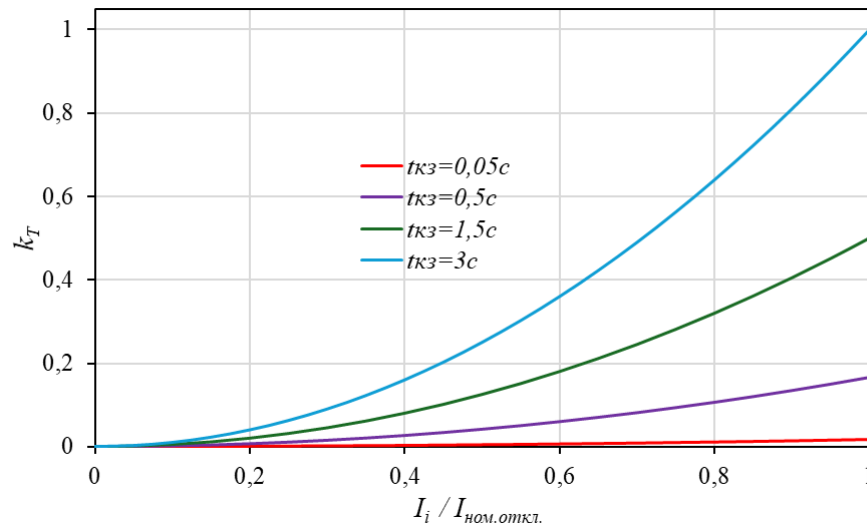


Рисунок 7 - Зависимость термического коэффициента от отношения тока короткого замыкания к номинальному току отключения

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.56.7>

Сопротивление силовой цепи выключателя в первую очередь отображает состояние контактной пары и характеризуется значением коэффициента $k_{r,i}$.

Помимо влияния $k_{r,i}$ на расход коммутационного ресурса при каждой коммутации, коэффициент проявляет детерминантные свойства, отображая текущее состояние выключателя в целом.

Обоснование детерминантного коэффициента

Под действием высоких температур и дуговой эрозии контактов их поверхность становится неравномерной, появляются каверны и шероховатости, увеличивается концентрация металлической взвеси в вакууме, возникают деформации контактной плоскости. Эти процессы в первую очередь приводят к уменьшению зоны соприкосновения контактной пары и появлению областей неравномерного перегрева. При этом главным и единственным измеряемым параметром, характеризующим деградацию контактной пары, является фактическое увеличение значения сопротивления. Конечно, при накоплении данных мониторинга имеется вероятность получения значений сопротивления по динамике нагрева выключателя при различных значениях тока нагрузки или нагрева при коротком замыкании. Изменение контактного сопротивления приводит к увеличению тепловыделения, и последующие коммутации проходят в худших условиях, чем предыдущие, что также увеличивает расход ресурса и определяет одну из сторон детерминантного подхода.

Согласно руководству по эксплуатации выключателя [10], если измеренное значение сопротивления контактов ($r_{k,i}$) превышает нормированное значение ($r_{норм.}$) не более чем в два раза ($k_{r,i} < 2$), то дальнейшая эксплуатация коммутационного модуля разрешается при условии, что реальная величина тока (I_p) удовлетворяет условию $I_p < I_{ном.} \sqrt{\frac{1}{k_r}}$, в противном случае необходимо приостановить эксплуатацию коммутационного модуля. На основе этих положений введем понятие допустимого тока выключателя (I_d) (формула 6):

$$I_d = I_{(ном.)} \sqrt{(1/k_r)}, \quad k_r \in [1; 2] \quad (5)$$

Графическая зависимость допустимого тока выключателя (I_d) относительно номинального тока выключателя от коэффициента сопротивления (k_r) при номинальном токе 1 кА представлена на рисунке 8.

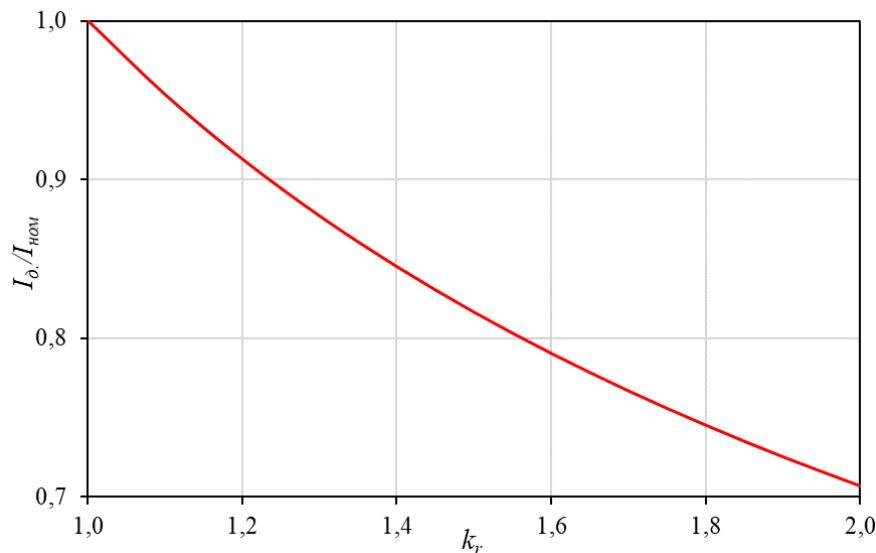


Рисунок 8 - Зависимость относительного значения допустимого тока к номинальному току выключателя от коэффициента сопротивления

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.56.8>

Анализ рисунка 8 позволяет утверждать, что ресурс полностью вырабатывается при достижении $k_{r,i}$ предельного значения, равного 2. Функция расхода ресурса выключателя $f_{pec}(k_r)$ в зависимости от значения коэффициента сопротивления, при условии, что в начальном состоянии (100% ресурса) функция принимает значение – 1, а при полном расходе ресурса – 0, имеет вид:

$$f_{pec} = \frac{\sqrt{\frac{2}{k_{r,i}} - 1}}{\sqrt{2} - 1}, \quad f_{pec} \in [0, 1] \quad (6)$$

Можно принять, что текущее значение остаточного ресурса выключателя прямо зависит от сопротивления контактов. Повреждения контактной пары накапливаются и детерминантно возрастают с каждым следующим отключением. Исходя из $k_{r,i} \sim N_{ост,i}$ и заменяя $k_{r,i}$ на выражение $(1 + N_{ост,i-1} / N_{ном.})$, получаем зависимость детерминантного коэффициента от текущего ресурса выключателя:

$$k_{det.r,i} = 1 + \frac{\sqrt{\frac{2}{1 + \frac{N_{ост,i-1}}{N_{ном.}}} - 1}}{\sqrt{2} - 1}, \quad (7)$$

где $k_{det.r,i}$ – значение детерминантного коэффициента на i -ой коммутации выключателя, о.е.

Зависимость детерминантного коэффициента от отношения остаточного коммутационного ресурса к номинальному, представлена на рисунке 9.

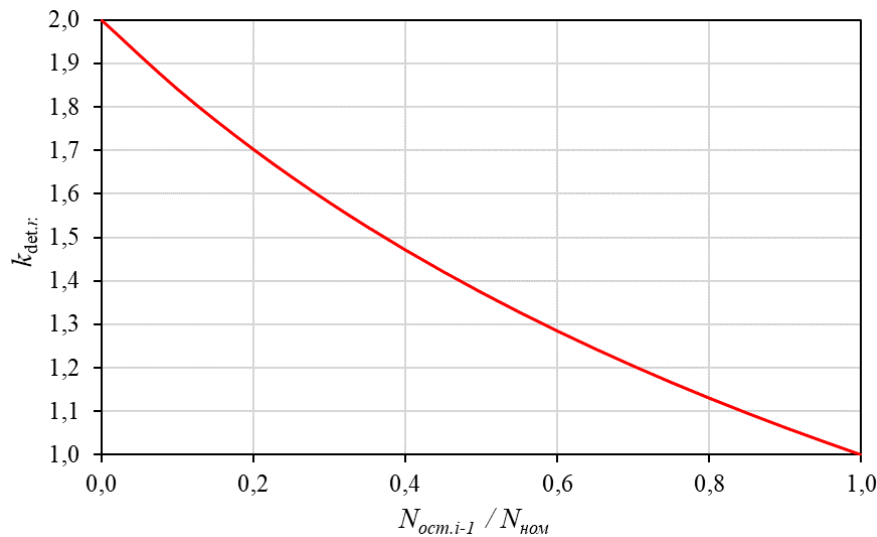


Рисунок 9 - Зависимость детерминантного коэффициента от отношения остаточного ресурса выключателя к его номинальному ресурсу

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.56.9>

Произведя замену $k_{r,i}$ на $k_{det,i}$ в выражении (3), получим выражение для определения остаточного ресурса выключателя в виде:

$$N_{ост,i} = N_{ост,i-1} - [N_{ном.} k_{det,k,i} k_{T,i} k_{L,i}] = N_{ост,i-1} - \left[\left(1 + \frac{\sqrt{\frac{2}{1 + \frac{N_{ост,i-1}}{N_{ном.}}}} - 1}{\sqrt{2} - 1} \right) \times \frac{I_i^2 t_{КЗ,i}}{I_{ном.отк.}^2 t_T} \times \left(\frac{I_i - I_{ном.}}{I_{ном.отк.} - I_{ном.}} \right)^2 \right] \quad (8)$$

Так как детерминантный коэффициент связан с отношением $N_{ост,i-1} / N_{ном.}$, после проведения испытаний необходимо скорректировать детерминантный коэффициент $k_{det,k,i}$ по фактическому значению $k_{r,m}$. Поскольку $k_{det,k,i}$ связан с $N_{ост,i}$, достаточно определить этот параметр по формуле:

$$N_{ост,i} = N_{ост,m} = N_{ном.} f_{pec.}(k_{r,m}) - n = \left[N_{ном.} \times \frac{\sqrt{\frac{2}{k_{r,m}}} - 1}{\sqrt{2} - 1} - n \right], \quad (9)$$

где m – порядковый номер испытания главной цепи полюса; k – реальное (измеренное) значение коэффициента сопротивления контактов главной цепи полюса при m -ом испытании, n – количество ранее произошедших физических коммутаций, о.е.

Для определения процентного остаточного ресурса на i -ой коммутации $N_{\%ост,i}$ (%) с нарастающим итогом, применяется следующее выражение (формула 10):

$$N_{\%ост,i} = \left(1 - \frac{N_{ост,i}}{N_{ном.}} \right) \times 100\% \quad (10)$$

Профилактические испытания «по состоянию»

Предиктивный анализ позволяет перейти от плановых профилактических испытаний к испытаниям «по состоянию». Необходимость проведения профилактического инструментального обследования выключателя можно определить по двум критериям.

Первый сигнал формируется, когда прогноз состояния выключателя указывает на необходимость проведения натурных испытаний. Это соответствует моменту достижения или превышения принятого порогового значения детерминантного коэффициента. При значении булевой переменной A , равном единице, возникает необходимость в проведении профилактических испытаний, что можно выразить строгой булевой зависимостью:

$$A = k_{det,r,i} \geq k_{зад,m}, \quad k_{зад,m} \in [1; 2], \quad A \in [0; 1] \quad (11)$$

где A – сигнал к проведению профилактических испытаний; $k_{зад,i}$ – заданная величина детерминантного коэффициента, о.е.

Второй сигнал формируется в момент, когда среднее значение действующего тока нагрузки, вычисленное по заданному числу замеров, превышает предельно допустимый ток I_δ (5). Этот сигнал предупреждает о недопустимости дальнейшей эксплуатации выключателя без снижения нагрузки. Логическое выражение данного сигнала принимает следующий вид:

$$B = \frac{\sum_{j=1}^x I_{\text{наг.}j}}{x} > I_{\text{ном.}} \sqrt{\frac{1}{k_{\text{дет.}r.i}}}, \quad B \in [0; 1] \quad (12)$$

где B – булева величина (сигнал) о необходимости снижения тока нагрузки выключателя; $I_{\text{ном.}j}$ – действующее значение тока при j -ом измерении, A ; j – номер измеренного тока нагрузки выключателя; x – выбранное количество измерений.

Булева величина A имеет стохастический характер, а величина B связана с фактическими измерениями тока нагрузки выключателя, которая принимается как средняя величина за выбранный период времени, при этом x зависит от частоты выборок за этот период.

Компьютерное моделирование

Целью моделирования не является валидация предлагаемого метода, поскольку отсутствуют верифицированные данные. Поэтому предлагается имитация процесса работы устройства предиктивной диагностики на основе номинальных параметров конкретного выключателя, установленного в распределительной сети 6–10 кВ. Такой анализ позволяет показать не только практическое применение выбранного метода совместно с детерминантным подходом, но и динамику процесса прогнозируемого расхода ресурса выключателя, а также его связь с результатами натуральных измерений.

Моделирование произведём для выключателя отходящей кабельной линии 10кВ (КЛ), длиной L . Устройство релейной защиты обеспечивает защиту КЛ зонами работы максимальной токовой защиты (МТЗ) и токовой отсечки (ТО), представленными на рисунке 10.

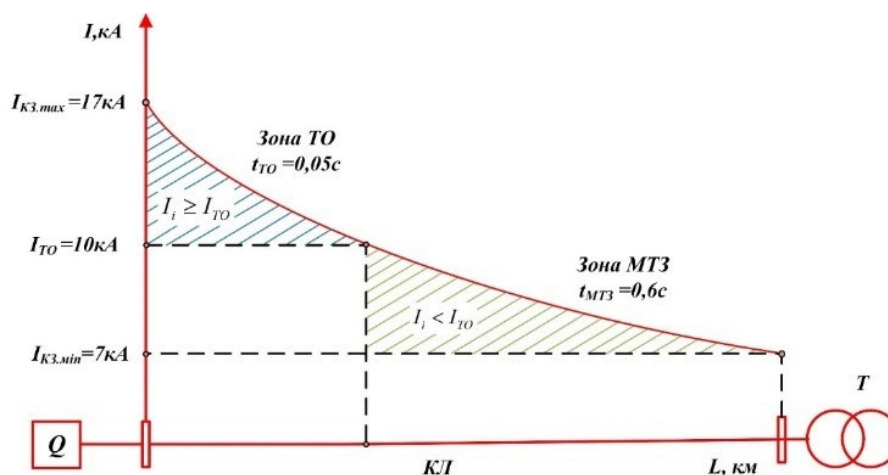


Рисунок 10 - Зоны защиты МТЗ и ТО в процессе ликвидации повреждения в кабельной линии 10кВ

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.56.10>

Номинальные параметры выключателя и условия эмуляции для расчёта коммутационного ресурса выключателя представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Номинальные параметры выключателя и условия эмуляции для расчёта коммутационного ресурса выключателя

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.56.11>

Наименование величины	Параметр	Значение	Единица измерения
Номинальный ток выключателя	$I_{\text{ном.}}$	0,8	кА
Номинальный ток отключения выключателя	$I_{\text{ном.откл.}}$	20	кА
Номинальный коммутационный ресурс выключателя	$N_{\text{ном.}}$	50000	ком.
Номинальный ресурс выключателя при номинальном токе отключения	$N_{\text{ном.откл.}}$	110	ком.
Время термической	t_T	3	с

Наименование величины	Параметр	Значение	Единица измерения
стойкости выключателя при воздействии номинального тока отключения			
Электрическое сопротивление главной цепи полюса	r_k	40	мкОм
Диапазон токов КЗ i -го отключения выключателя	I_i	7-17	кА
Зона токовой отсечки (ТО)	$I_{TO} \geq$	10	кА
Полное время срабатывания ТО	t_{TO}	0,05	с
Зона максимальной токовой защиты (МТЗ)	$I_{MTZ} <$	10	кА
Полное время срабатывания МТЗ	t_{MTZ}	0,6	с

Для имитации параметров коммутаций выключателя приняты случайные значения токов. Значения времени воздействия тока приняты в зависимости от зоны защиты. Общие условия описаны следующим выражением:

$$\begin{cases} I_i = \xi(n) \in N, I_i \in [I_{K3.min}; I_{K3.max}] \\ t_{K3.i} = t_{MTZ}, \text{ при } I_i < I_{MTZ} \\ t_{K3.i} = t_{TO}, \text{ при } I_i \geq I_{TO} \end{cases} \quad (13)$$

где: – $\xi(n)$ случайных значений токов короткого замыкания в диапазоне от до $I_{K3.min}$, кА.

Принятые значения ($k_{зад.m}$) для корректировки текущего остаточного ресурса приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Принятые условия для корректировки остаточного ресурса выключателя

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.56.12>

Номер измерения m	Условие для корректировки $k_{зад.m}$	Измеренное значение коэффициента сопротивления контактов $k_{r.m}$	Примечание
0	–	1	Заводские испытания
1	1,1	1,02	
2	1,2	1,11	
3	1,3	1,2	
4	1,4	1,29	
5	1,5	1,38	
6	1,6	1,47	
7	1,7	1,56	
8	1,8	1,65	
9	1,9	1,74	
10	2,0	1,83	
11	2,1	1,92	
12	2,2	2,01	

График зависимости детерминантного коэффициента от количества последовательных коммутаций выключателя представлен на рисунке 11.

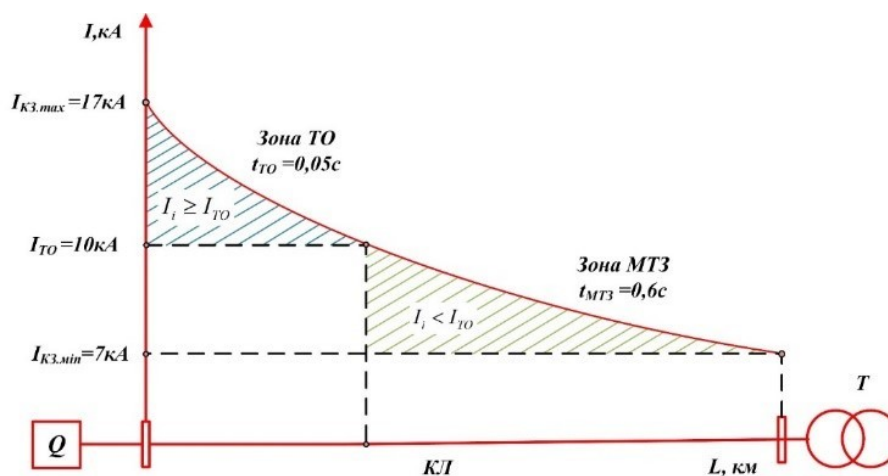


Рисунок 11 - Значения детерминантного коэффициента при последовательных коммутациях выключателя
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.56.13>

Результаты моделирования в точках коррекции представлены в таблице 3. Результаты оценки состояния выключателя отображены на графике рисунка 12.

Таблица 3 - Полученные результаты эмуляций определения ресурса выключателя в точках коррекции по коэффициенту сопротивления контактов

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.56.14>

i	m	$k_{r,m}$	$k_{det,k,i}>$	$N_{осм.i}$	$N_{%осм.i}$
0	0	1	1,1	50000	100,00
26	1	1,02	1,2	48318	96,64
74	2	1,11	1,3	41321	82,64
106	3	1,2	1,4	351261	70,25
134	4	1,29	1,5	295911	59,18
171	5	1,38	1,6	246071	49,22
187	6	1,47	1,7	200891	40,18
206	7	1,56	1,8	159671	31,93
242	8	1,65	1,9	121871	24,37
258	9	1,74	2,0	87041	17,41
277	10	1,83	2,1	54821	10,96
295	11	1,92	2,2	24891	4,98
320	12	2,01	2,3	-3001	-0,60

График наглядно иллюстрирует увеличение детерминантного коэффициента от количества коммутаций, который демонстрирует последовательный рост. Этот рост не является монотонным; он сопровождается периодическими падениями. Скачки обусловлены процессом корректировки остаточного ресурса выключателя. Эта корректировка происходит в моменты проведения испытаний, в ходе которых определяется реальное сопротивление контактов. Таким образом, график отражает не только общую тенденцию износа или изменения состояния выключателя, но и то, как результаты конкретных проверок влияют на оценку его рабочего состояния. На рисунке 12 представлена зависимость коммутационного ресурса выключателя от количества коммутаций.

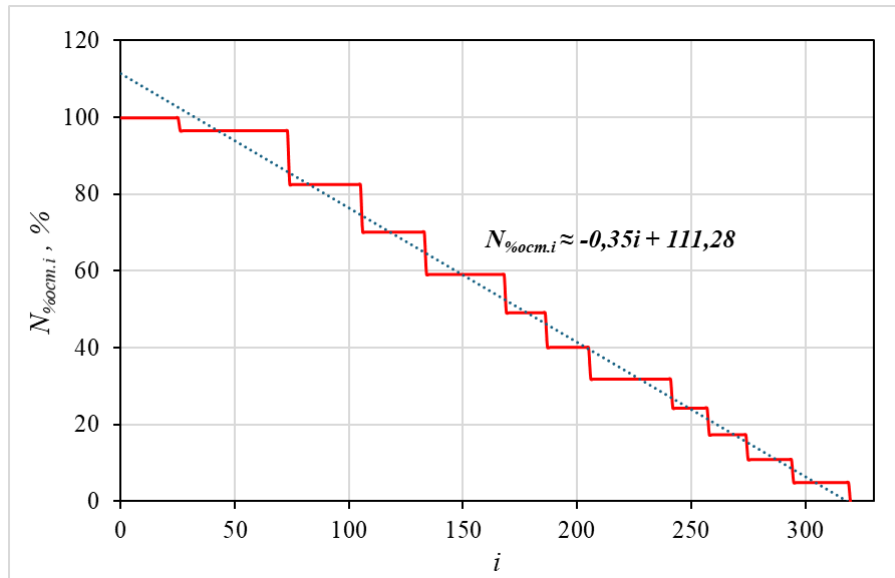


Рисунок 12 - Зависимость коммутационного ресурса выключателя от количества коммутаций

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.56.15>

На графике 12 наглядно продемонстрирована зависимость остаточного коммутационного ресурса электрического выключателя (в процентах) от количества произведённых им коммутаций. К концу рассматриваемого диапазона, при приблизительно 320 коммутациях, ресурс снижается примерно до 5%. Это является чётким индикатором приближения выключателя к пределу его эксплуатационных возможностей и служит сигналом для рассмотрения вопроса о его замене или проведении ремонтных работ.

Как выявлено ранее, методы, предлагаемые производителем выключателей, являются единственным экспериментально подтверждённым способом определения расхода коммутационного ресурса при некоторых допущениях. Поэтому сверку полученных результатов произведём на основе аппроксимации зависимости (рис. 5), которая описана в руководстве по эксплуатации блока микропроцессорной релейной защиты БМРЗ-50 [2], далее – Метод 2. После преобразований выражения и замены переменных на принятые зависимость имеет вид:

$$N_{2.ср.и} = \left(\frac{N_{ном.}}{N_{ном.откл.}} \right) \left(1 - \frac{\ln\left(\frac{I_{ном.откл.}}{I}\right)}{\ln\left(\frac{I_{ном.откл.}}{I_{ном.}}\right)} \right) \quad (14)$$

Проверку расчета произведем на основании среднего значения за одну коммутацию $N_{ср.} = [N_{ном.} / N_{доп.}]$ и допустимого количества коммутаций $N_{доп.} = [N_{ном.} / N_{ср.}]$.

Для определения среднего значения расхода ресурса выключателя за единичную коммутацию $N_{1.ср.}$ для функции (14) определим математическое ожидание $M[N_{2.ср.и}]$, на том же интервале тока 7-17 кА, что и для предлагаемого метода. Опуская преобразование, получаем выражение вида:

$$\begin{cases} N_{2.ср.} = M[N_{2.ср.и}] = \frac{1}{I_2 - I_1} \int_{I_1}^{I_2} N(I) dI = \frac{K}{I_2 - I_1} \cdot \frac{I_2^{\alpha+1} - I_1^{\alpha+1}}{\alpha+1}, \\ K = \left(\frac{N_{ном.}}{N_{ном.откл.}} \right) \left(1 - \frac{\ln(I_{ном.откл.})}{\ln(I_{ном.откл.}/I_{ном.})} \right), \\ \alpha = \frac{\ln\left(\frac{N_{ном.}}{N_{ном.откл.}}\right)}{\ln\left(\frac{I_{ном.откл.}}{I_{ном.}}\right)} \end{cases} \quad (15)$$

где I_1 – минимальное значение интервала действующего значения тока, А; I_2 – максимальное значение интервала действующего значения тока, А; K и α – постоянные коэффициенты.

Для расчета значений математического ожидания в языке программирования Visual Basic for Applications (VBA) для Microsoft Excel разработана функция EV_Method1. Вызов функции имеет следующий формат: =EV_Method1(I_1 ; I_2 ; $N_{ном.}$; $N_{ном.откл.}$; $I_{ном.}$; $I_{ном.откл.}$). Значения $I_1=7000$ А, $I_2=17000$ А.

Допустимое количество коммутаций для рассматриваемого метода (Метод 2) определим, из линейной зависимости рисунка 12, из условия $N_{\%ост.i} = -0,35i + 111,28 = 0$, тогда $N_{дон.} = i = [111,28/0,35] = 318$ коммутаций. Среднее значение расхода ресурса ВВ определим как $N_{ср.} = [50000/318]=157$ коммутаций.

Результаты сравнения предлагаемого метода (Метод 1), и метода по экспериментальным характеристикам завода-изготовителя принятого выключателя (Метод 2) представлены в таблице 4.

Таблица 4 - Результаты расчетов и сравнение методов

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.56.16>

Наименование	$N_{ср.}$, коммутаций	$N_{дон.}$, коммутаций	$N_{ср.}(M2) - N_{ср.}(M1)$, коммутаций	$N_{дон.}(M1) - N_{дон.}(M2)$, коммутаций
Метод 1 (M1)	157	318	24	41
Метод 2 (M2)	181	277		
Погрешность процентах от большего, %			13,26	12,89

Результаты сравнения методов (табл. 4) показывают, что приложенный метод дает сопоставимые значения с заводской экспериментальной зависимостью. Расхождение результатов показывает, что применение детерминантного подхода позволяет связать результаты практических испытаний с прогностической моделью и скорректировать прогноз в зависимости от условий эксплуатации ВВ.

Конечно, предложенный сравнительный анализ не является валидацией предлагаемого метода, поскольку значения измеренных величин сопротивления контактов приняты. Однако данный расчет позволяет оценить сходимость с методом производителя выключателей и может применяться для оценки соответствия мониторинговых и лабораторных данных принимаемой прототипической модели.

Обсуждение результатов

В процессе эксплуатации значение сопротивления определяется результатами лабораторных испытаний, для которых требуется отключение и демонтаж выключателя, что ограничивает количество верификаций принятой модели. Решением может стать проведение испытаний по состоянию, которое инициирует устройство предиктивной аналитики.

Необходимо отметить, что при проведении лабораторных замеров сопротивления первичной цепи выключателя необходимо руководствоваться рекомендациями завода-изготовителя для достижения достоверных результатов измерения сопротивления [10]. Помимо этого, немаловажную роль имеют погрешности измерений контролируемых параметров, измеряемых устройствами предиктивной диагностики. В первую очередь большое влияние на общую погрешность применяемых методов вносит измерение первичного тока, которое связано с коэффициентом предельной кратности обмоток измерения трансформаторов тока (ТТ). В качестве альтернативы ТТ можно применять цифровые токовые датчики без сердечника, такие как «петля Роговского» или оптические ТТ, а для снижения погрешности измерений прочих параметров целесообразно применять цифровые измерительные датчики.

Детерминантный коэффициент демонстрирует стохастический характер, в то время как корректировка сопротивления на основе фактических измерений устанавливает детерминантную зависимость расхода ресурса выключателя. Детерминантный подход обеспечивает прогнозирование сопротивления контактов дугогасящей камеры через комплексный учёт состояния выключателя после предыдущих коммутаций и результатов испытаний. Полученные результаты найдут применение в системах мониторинга, предиктивной диагностики и оптимизации стратегий технического обслуживания электросетевого комплекса.

Заключение

В работе предложен детерминантный подход к оценке остаточного коммутационного ресурса вакуумных выключателей 6–10 кВ. Данный подход комплексно учитывает факторы, влияющие на износ оборудования, в частности, предыдущие коммутации, сопротивление контактов, термическое воздействие токов короткого замыкания, а также корректируется с учетом данных испытаний. Он обеспечивает возможность непрерывного мониторинга состояния выключателей без их физического отключения. Использование индивидуального детерминантного коэффициента дает возможность прогнозировать оставшийся ресурс с учетом специфических условий эксплуатации каждого конкретного выключателя. Ниже представлены ключевые результаты работы:

1. Предложен метод расчета остаточного коммутационного ресурса с учетом предшествующих коммутаций. В отличие от статистических методов, подход позволяет учитывать индивидуальные особенности эксплуатации каждого выключателя.

2. Определено влияние детерминантного коэффициента на вычисления остаточного ресурса. Показано, что этот коэффициент связывает текущее состояние контактов с общим износом выключателя и позволяет прогнозировать его дальнейшее поведение.

3. Разработана методика коррекции параметра остаточного ресурса на основе данных испытаний выключателя. Корректировка выполняется при достижении пороговых значений коэффициента сопротивления контактов, что повышает точность оценки.



4. Определена функция расхода ресурса выключателя $f_{\text{рес}}(k_r)$, описывающая зависимость износа от коэффициента сопротивления контактов. Функция нормирована: при 100% ресурса ее значение равно 1, при полном износе – 0.

6. Проведено компьютерное моделирование процесса расхода коммутационного ресурса на примере выключателя TER_VCB15_LD8_F. Моделирование подтвердило работоспособность метода и позволило отследить динамику изменения остаточного ресурса при различных условиях эксплуатации.

7. Проведен сравнительный анализ метода с заводской экспериментальной зависимостью расхода коммутационного ресурса.

8. Обоснована практическая значимость подхода для систем предиктивной диагностики: метод позволяет непрерывно мониторить состояние выключателей без их отключения, формировать сигналы для своевременного проведения профилактических мероприятий и оптимизировать графики технического обслуживания, что в совокупности способствует снижению эксплуатационных затрат.

Предложенный детерминантный подход обеспечивает более точное и надёжное прогнозирование остаточного коммутационного ресурса вакуумных выключателей по сравнению с традиционными методами. Его внедрение в устройства мониторинга и предиктивной диагностики повысит надёжность электроэнергетических систем и эффективность эксплуатации коммутационного оборудования. Длительное отслеживание динамики параметров выключателя в сочетании с накоплением эксплуатационных данных параметрического мониторинга заложит основу для создания новых и уточнения существующих методов оценки коммутационного ресурса выключателей.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Андреев Д.А. Анализ методов оценки коммутационного ресурса высоковольтных выключателей / Д.А. Андреев, И.А. Назарычев // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. — 2008. — № 2. — С. 69–84.
2. ДИВГ.648228.062 РЭ-ЛУ. Блок микропроцессорный релейной защиты БМРЗ. Руководство по эксплуатации. — 2021. — URL: https://www.mtrele.ru/files/filedoc/releynaya-zashita/bmrz-50/bmrz-50_new.pdf (дата обращения: 14.03.2026).
3. Учет остаточного ресурса высоковольтных выключателей. ООО «НТЦ "Механотроника"» // Электроэнергия. Передача и распределение. — 2019. — № 1 (52). — С. 120–121. — EDN KXHNZN.
4. ПКЭ.АТЛАС-231.05.РЭ. Цифровое устройство релейной защиты и автоматики серии «Атлас-231». Руководство по эксплуатации. — 2024. — URL: <https://elektrum.info/wp-content/uploads/2024/02/Rukovodstvo-po-ekspluatatsii-Atlas-231.pdf> (дата обращения: 14.03.2026).
5. ЭНАС.426474.001 РЭ. Регистратор коммутационного ресурса выключателя «РЕСУРС-1». Руководство по эксплуатации. — 2017. — URL: http://osw.su/pub/re-resurs-1_3.3.docx (дата обращения: 14.03.2026).
6. Павлюченко Д.А. Оценка коммутационного ресурса синхронного вакуумного выключателя / Д.А. Павлюченко, Е.В. Прохоренко, Д.Е. Шевцов // Главный энергетик. — 2016. — № 2. — С. 32–39.
7. Павлюченко Д.А. Определение и мониторинг коммутационного ресурса синхронного вакуумного выключателя среднего напряжения / Д.А. Павлюченко, Е.В. Прохоренко, В.Н. Черепанский [и др.] // Энергия единой сети. — 2025. — № 5–6 (79). — С. 18–24.
8. Косорлуков И.А. Устройство автоматизированного комплексного мониторинга электротехнического оборудования : пат. 2845460 РФ, МПК H02H 7/05 / И.А. Косорлуков, М.С. Тимченко, А.В. Соловьев [и др.]; заявитель и патентообладатель Самарский государственный технический университет. — № 2025103303; заявл. 2025-02-14; опубл. 2025-08-19. — URL: <https://patents.google.com/patent/RU2845460C1/en> (дата обращения: 17.08.2026).
9. Косорлуков И.А. Определение остаточного ресурса выключателей 6–10 кВ с учетом влияния уставок релейной защиты и величины сквозного тока короткого замыкания / И.А. Косорлуков, А.В. Соловьев, М.С. Тимченко [и др.] // Энергобезопасность и энергосбережение. — 2024. — № 5. — С. 56–63.
10. TER_CBdoc_UG_26. Вакуумный выключатель. Руководство по эксплуатации TER_VCB15_LD8_F, Shell2_F, ShellFT2_F, HD1_F, HDFT1_F, HD1S_F. Версия 2.0. — URL: https://www.tavrida.ru/upload/iblock/c4b/s11cni1l2gu3yy780b1vir4t9c1fkdy/TER_CBdoc_UG_26.pdf (дата обращения: 14.03.2026).

Список литературы на английском языке / References in English

1. Andreev D.A. Analiz metodov otsenki kommutatsionnogo resursa vysokovol'tnykh vyklyuchateley [Analysis of methods for estimating the switching life of high-voltage circuit breakers] / D.A. Andreev, I.A. Nazarychev // Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta [Bulletin of Ivanovo State Power Engineering University]. — 2008. — № 2. — P. 69–84. [in Russian]



2. DIVG.648228.062 RE-LU. Blok mikroprotsessornyy reley noy zashchity BMRZ. Rukovodstvo po ekspluatatsii [DIVG.648228.062 RE-LU. Microprocessor relay protection unit BMRZ. Operation manual]. — 2021. — URL: https://www.mtrele.ru/files/filedoc/releynaya-zashita/bmrz-50/bmrz-50_new.pdf (accessed: 14.03.2026). [in Russian]
3. Uchet ostatochnogo resursa vysokovol'tnykh vyklyuchateley. OOO «NTTs "Mekhanotronika"» [Accounting for the residual life of high-voltage circuit breakers. NTC Mekhanotronika LLC] // Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie [Electric Power. Transmission and Distribution]. — 2019. — № 1 (52). — P. 120–121. — EDN KXHNZN. [in Russian]
4. PKE.ATLAS-231.05.RE. Tsifrovoye ustroystvo reley noy zashchity i avtomatiki serii "Atlas-231". Rukovodstvo po ekspluatatsii [PKE.ATLAS-231.05.RE. Digital relay protection and automation device of the Atlas-231 series. Operation manual]. — 2024. — URL: <https://elektrum.info/wp-content/uploads/2024/02/Rukovodstvo-po-ekspluatatsii-Atlas-231.pdf> (accessed: 14.03.2026). [in Russian]
5. ENAS.426474.001 RE. Registrator kommutatsionnogo resursa vyklyuchatelya "RESURS-1". Rukovodstvo po ekspluatatsii [ENAS.426474.001 RE. Circuit breaker switching life recorder "RESURS-1". Operation manual]. — 2017. — URL: http://osw.su/pub/re-resurs-1_3.3.docx (accessed: 14.03.2026). [in Russian]
6. Pavlyuchenko D.A. Otsenka kommutatsionnogo resursa sinkhronnogo vakuumnogo vyklyuchatelya [Assessment of commutation life-time of synchronous vacuum switch] / D.A. Pavlyuchenko, E.V. Prokhorenko, D.E. Shevtsov // Glavnyy energetik [Chief Power Engineer]. — 2016. — № 2. — P. 32–39. [in Russian]
7. Pavlyuchenko D.A. Opredelenie i monitoring kommutatsionnogo resursa sinkhronnogo vakuumnogo vyklyuchatelya srednego napryazheniya [Determination and monitoring of the switching life of a medium-voltage synchronous vacuum circuit breaker] / D.A. Pavlyuchenko, E.V. Prokhorenko, V.N. Cherepanskiy [et al.] // Energiya edino y seti [Energy of the Unified Grid]. — 2025. — № 5–6 (79). — P. 18–24. [in Russian]
8. Kosorlukov I.A. Ustroystvo avtomatizirovannogo kompleksnogo monitoringa elektrotekhnicheskogo oborudovaniya [Device for automated complex monitoring of electrical equipment] : pat. 2845460 Russian Federation, IPC H02H 7/05 / I.A. Kosorlukov, M.S. Timchenko, A.V. Solovyov [et al.] ; the applicant and the patentee Samara State Technical University. — № 2025103303; appl. 2025-02-14; publ. 2025-08-19. — URL: <https://patents.google.com/patent/RU2845460C1/en> (accessed: 17.08.2026). [in Russian]
9. Kosorlukov I.A. Opredelenie ostatochnogo resursa vyklyuchateley 6-10 kV s uchetom vliyaniya ustavok reley noy zashchity i velichiny skvoznogo toka korotkogo zamykaniya [6-10 kV breaker remaining life calculation considering relay protection settings and external short circuit current value] / I.A. Kosorlukov, A.V. Solovyov, M.S. Timchenko [et al.] // Energobezopasnost' i energosberezhenie [Energy Safety and Energy Economy]. — 2024. — № 5. — P. 56–63. [in Russian]
10. TER_CBdoc_UG_26. Vakuumnyy vyklyuchatel'. Rukovodstvo po ekspluatatsii TER_VCB15_LD8_F, Shell2_F, ShellFT2_F, HD1_F, HDFT1_F, HD1S_F. Versiya 2.0 [TER_CBdoc_UG_26. Vacuum circuit breaker. Operation manual TER_VCB15_LD8_F, Shell2_F, ShellFT2_F, HD1_F, HDFT1_F, HD1S_F. Version 2.0]. — URL: https://www.tavrida.ru/upload/iblock/c4b/s11cni1l2gu3yy780b1virl4t9c1fkdy/TER_CBdoc_UG_26.pdf (accessed: 14.03.2026). [in Russian]