

УДК 621.316.56
Шифр специальности ВАК 2.4.3., 2.4.2.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ И МОНИТОРИНГ КОММУТАЦИОННОГО РЕСУРСА СИНХРОННОГО ВАКУУМНОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

Статья посвящена актуальной проблеме определения и мониторинга остаточного коммутационного ресурса вакуумных выключателей синхронного типа в электрических сетях среднего напряжения. Проведен анализ существующих методик оценки ресурса, которые основаны на использовании паспортных данных и типовых параметров, выявлен их ключевой недостаток — отсутствие учета реального энергетического воздействия на дугогасительное устройство при каждой операции отключения. Предложена методика, идею которой составляет расчет доли износа от каждой операции на основе значения интеграла Джоуля. Практическая реализация методики воплощена в специализированном программном обеспечении, которое обеспечивает мониторинг, прогнозирование остаточного ресурса и визуализацию состояния аппарата в реальном времени.



Вакуумный выключатель синхронного типа КЭПС-BBC 10/1000/25

Источник фото: архив ГК «КЭПС»

АВТОРЫ:
Д.А. Павлюченко, к. т. н., доцент,
ORCID ID 0000-0003-4522-9557,
dap@keps.pro,
ФГБОУ ВО «Новосибирский
государственный технический
университет»
Е.В. Прохоренко, к. т. н., доцент,
ORCID ID 0009-0005-0963-7184,
evp@keps.pro
В.Н. Черепанский,
ORCID ID 0009-0004-6702-432X,
ch_vn@keps.pro,
ГК «КЭПС»
В.А. Хайруллин,
ORCID ID 0009-0005-5854-6748,
khay.slava.01@mail.ru
М.Р. Жияев,
ORCID ID 0009-0008-4508-9711,
maks.it@keps.pro,
ФГБОУ ВО «Новосибирский
государственный технический
университет», ГК «КЭПС»

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
#вакуумный выключатель
синхронного типа; #среднее
напряжение; #коммутационный
ресурс; #интеграл Джоуля;
#мониторинг состояния

↓ ДЛ Я ЦИТИРОВАНИЯ:

Павлюченко Д.А., Прохоренко Е.В., Черепанский В.Н., Хайруллин В.А., Жияев М.Р. Определение и мониторинг коммутационного ресурса синхронного вакуумного выключателя среднего напряжения // Энергия единой сети. 2025. № 5–6. С. 18–24.

©©

ВВЕДЕНИЕ

Ключевым компонентом современных электрических сетей среднего напряжения являются вакуумные выключатели, обеспечивающие надежное отключение как рабочих токов, так и токов короткого замыкания. Их преимущества — высокая отключающая способность, минимальные эксплуатационные расходы, экологичность и долговечность — сделали их основным коммутационным аппаратом в распределительных электрических сетях.

Одним из факторов, определяющих срок службы вакуумных выключателей, является его коммутационный ресурс — способность сохранять работоспособность после многократных отключений аварийных токов. Каждая такая операция приводит к постепенной деградации контактной группы и дугогасящей среды из-за воздействия высокотемпературной плазмы дуги.

Актуальной тенденцией развития электроэнергетики является переход от планово-предупредительных ремонтов к обслуживанию оборудования по состоянию. Однако такой переход требует внедрения устройств и программного обеспечения, позволяющего в режиме реального времени осуществлять мониторинг и анализ состояния соответствующего оборудования. Например, для выключателей среднего напряжения — остаточного ресурса по коммутационной стойкости согласно ГОСТ Р 52565–2006 [1].

Учет механического ресурса может производиться при каждом срабатывании привода выключателя независимо от протекания или отсутствия тока. Механический ресурс выключателя обычно задается в паспортных данных. Так как его величина характеризует работу выключателя без токовой нагрузки, то обычно нет необходимости рассчитывать и прогнозировать его значение, за исключением специфических особенностей эксплуатации [2].

Коммутационный ресурс без осмотра и ремонта дугогасительного устройства определяется допустимым для выключателя суммарным числом операций включения и отключения при нагрузочных токах и токах КЗ. Как видно, данное определение не устанавливает ни количества операций, ни значений коммутируемого тока, ни типа выполняемых операций (отключения или включения), ни параметров следующей операции, в которой может произойти отказ выключателя. Попытки ввести однозначность в понятие коммутационного ресурса, например, количество операций отключения номинального тока отключения, не удалось, во-первых, из-за дороговизны подобной процедуры (необходимо проводить достаточно большую серию испытаний при одинаковых условиях, что выходит за рамки типовых испытаний), а во-вторых, из-за того, что, как показывает статистика, выключатели за время жизни практически ни разу не отключают токи по значению близкие к номинальным токам отключения [3].

Исходя из этого, предпринимаются попытки предложить подходы к оценке коммутационного ресурса, в которых при подсчете ресурса можно использовать различные значения коммутируемого тока. В основе этого лежит предположение, что каждая коммутационная операция приводит к некоторому износу контактов и других элементов дугогасительной камеры, ограничивая срок

службы, и что в зависимости от значения коммутируемого тока в процентах от номинального тока отключения этот износ можно оценить. Такое приближение к оценке коэффициента износа при разных токах отключения принято в документах МЭК [4].

На базе подобного подхода разрабатываются методики учета коммутационного ресурса выключателя различными исследовательскими организациями и производителями электрооборудования, в том числе и отечественными.

МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ КОММУТАЦИОННОГО РЕСУРСА ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ

Существует несколько подходов к определению коммутационного ресурса выключателей. Их можно разделить на две основные группы:

- 1) методики, основанные на построении зависимости допустимого числа коммутаций от величины коммутируемого тока на основании паспортных данных выключателя;
- 2) методики, учитывающие совокупность параметров, на основании данных о которых формируется интегральный показатель уровня технического состояния выключателя.

Все рассматриваемые методики позволяют получить величину коммутационного ресурса. На основании результирующих численных значений ресурса можно сделать выводы об уровне технического состояния оборудования с той или иной степенью точности. В то же время каждая группа методик имеет свои характерные достоинства и недостатки.

Методики первой группы учитывают лишь один эксплуатационный фактор — коммутируемый ток. Однако необходимо отметить, что данный фактор больше всего влияет на значение ресурса, так как оказывает тепловое, электрическое, механическое и косвенно химическое воздействие на оборудование [3].

Например, в работе [5] представлено выражение (1), определяющее количество отключений N (циклов ВО) при различных токах (рис. 1):

$$N = KP_{I_{0,ном}} \cdot \left(\frac{KP_{I_{ном}}}{KP_{I_{0,ном}}} \right)^{\frac{\ln(I_{откл})}{\ln(I_{ном})}}, \tag{1}$$

где $KP_{I_{0,ном}}$ — ресурс по коммутационной стойкости при 100 % номинального тока отключения, циклы ВО;
 $KP_{I_{ном}}$ — ресурс по коммутационной стойкости выключателя при номинальном токе, циклы ВО;
 $I_{0,ном}$ — номинальный ток отключения выключателя, А;
 $I_{ном}$ — номинальный ток выключателя, А;
 $I_{откл}$ — ток отключения, А.

Методика, представленная в Методических указаниях по определению расхода коммутационного ресурса выключателей при эксплуатации [6], заключается в следующем.

Расход коммутационного ресурса R_k подсчитываем как

$$R_k = \sum \frac{1}{n_{oI}}, \tag{2}$$

где n_{oI} — количество отключений при токе отключения, шт.

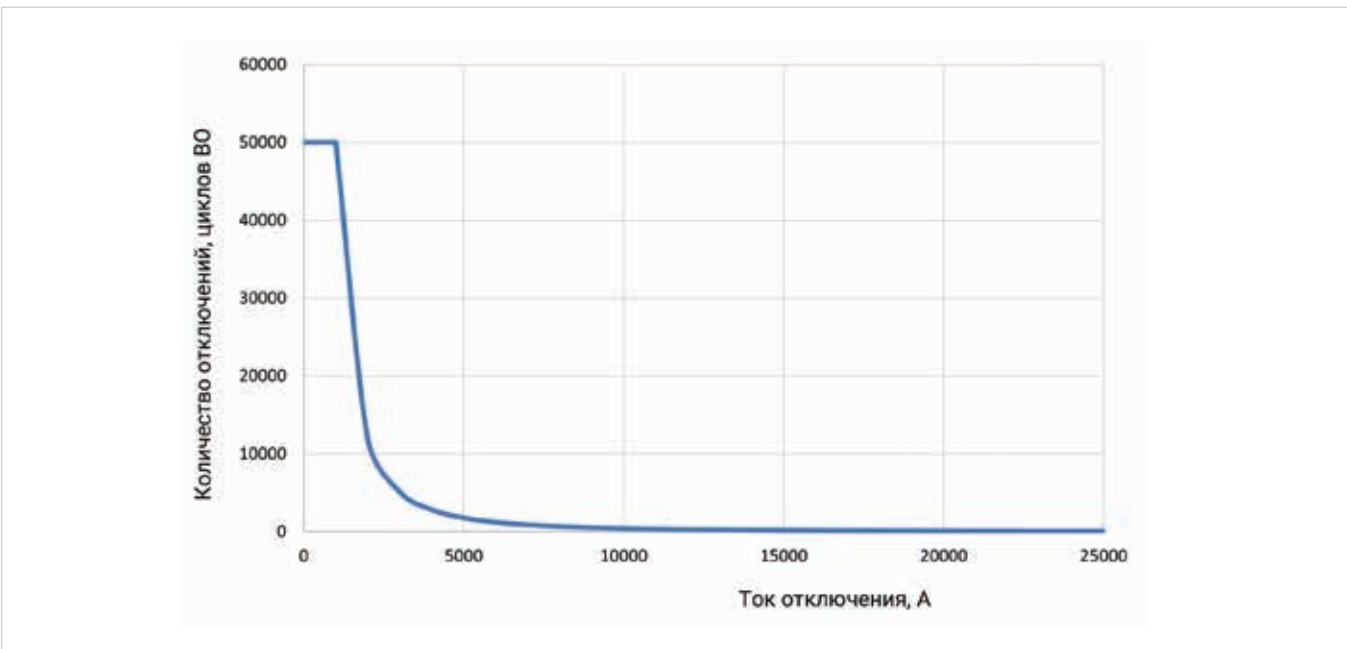


Рис. 1. Зависимость коммутационного ресурса выключателя от тока отключения

Затем определяется критерий вывода выключателя в ремонт:

$$\sum \frac{1}{n_{oI}} > 1 - \frac{1}{n_{в.мин}}, \quad (3)$$

где $n_{в.мин}$ — допустимое количество отключении при наибольшем токе, возможном в месте установки выключателя.

Ресурс считается исчерпанным, если удовлетворяется неравенство.

В программном обеспечении [7] оценку коммутационного ресурса выключателя осуществляют по выражениям (4) и (5):

Рассчитывается количество отключений N из уравнения прямой проходящей через две заданные точки:

$$\frac{I_{откл} - I_1}{I_2 - I_1} = \frac{N - N_1}{N_2 - N_1} \rightarrow N = \frac{(I_{откл} - I_1) \cdot (N_2 - N_1)}{I_2 - I_1} + N_1, \quad (4)$$

где $I_{откл}$ — ток отключения, кА;

I_1, I_2, N_1 и N_2 — известные точки графика (рис. 2).

Остаточный ресурс выключателя составляет:

$$Res_{ост} = Res - \frac{1}{N} \cdot 100\% \quad (5)$$

где N — количество отключений, шт;

Res — начальный коммутационный ресурс, %;

$Res_{ост}$ — остаточный коммутационный ресурс, %.

Вторую группу представляют собой экспертные системы, которые позволяют учесть большое количество эксплуатационных факторов [8, 9]. В данном случае

в результате обработки замеров, полученных на базе различных инструментальных методов контроля, экспертная система с использованием весовых коэффициентов для учета совокупности факторов формирует обобщенную интегральную оценку состояния аппарата. Тем не менее данный подход обладает существенными недостатками, заключающимися как в необходимости оснащения анализируемого аппарата набором измерительных устройств, что существенно и недопустимо увеличивает стоимость выключателя, так и в сложности определения весовых коэффициентов, от качества которых напрямую зависит результат оценки.

В ходе анализа существующих методик оценки коммутационного ресурса вакуумных выключателей были выявлены их ключевые особенности:

- методика на основе выражения (1) учитывает зависимость ресурса от тока отключения, но требует точных данных по номинальным параметрам;
- методика на основе выражения (2) основана на суммировании относительного износа, но использует типовые графические зависимости;
- методика на основе выражений (3, 4) применяет линейную интерполяцию, что может давать значимую погрешность при нелинейной зависимости износа выключателя.

Таким образом, существующие методики имеют свои преимущества, но зачастую требуют ручного ввода параметров и поэтапной обработки информации, а также не всегда учитывают весь комплекс факторов износа.

Для повышения точности и удобства практического применения требуется разработка усовершенствованного подхода.

ПРЕДЛАГАЕМАЯ МЕТОДОЛОГИЯ ОЦЕНКИ КОММУТАЦИОННОГО РЕСУРСА ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ

Большинство из рассмотренных выше подходов основаны на использовании данных, полученных предприятием-изготовителем в ходе многочисленных предварительных испытаний выключателя конкретного типа. Эти испытания позволяют построить кривую зависимости возможного количества коммутаций от коммутируемого тока. Трудоемкость и высокая стоимость такой процедуры подчеркивают актуальность разработки новых методик оценки коммутационного ресурса.

Кроме того, существующие методики зачастую не учитывают или учитывают лишь косвенно ряд критически важных параметров каждой коммутационной операции: вид короткого замыкания, фактическую длительность горения дуги и другие факторы, непосредственно влияющие на износ аппарата.

Износ контактной системы, происходящий при каждом срабатывании, является ключевым фактором, ограничивающим срок службы выключателя. Согласно [1], ресурс по коммутационной стойкости устанавливается как допустимое количество отключений номинального тока отключения. Однако на практике токи коммутации варьируют от нуля до этого номинального значения. При этом разрушение контактов при малых токах незначительно, в то время как при отключении номинального тока оно максимально.

Основной причиной деградации контактов является тепловое и эрозионное воздействие электрической дуги, энергия которой пропорциональна коммутируемому току и времени. Следовательно, для адекватной оценки сработанного и остаточного ресурса необходим учет не номинальных, а реальных значений энергии, выделяющейся в выключателе во время горения дуги при конкретной операции.

Как известно, мерой термического воздействия тока короткого замыкания является интеграл Джоуля (B_k):

$$B_k = \int_0^{t_{откл}} i_{кл}^2 dt, \quad (6)$$

где $i_{кл}$ — ток КЗ в момент времени t ;

$t_{откл}$ — продолжительность КЗ.

Таким образом, для полноценного и точного расчета коммутационного ресурса необходимо учитывать фактические токи, реальное время протекания тока короткого замыкания и продолжительность горения дуги.

Это стало возможным благодаря современным техническим решениям. Например, такие инновационные решения, как вакуумные выключатели синхронного типа КЭПС-ВВС [10] со встроенными регистраторами, позволяют фиксировать осциллограммы процессов короткого замыкания.

На основе этих данных, используя численное интегрирование, можно с высокой точностью рассчитать фактический интеграл Джоуля — энергию, выделившуюся при каждой коммутации, методом прямоугольников:

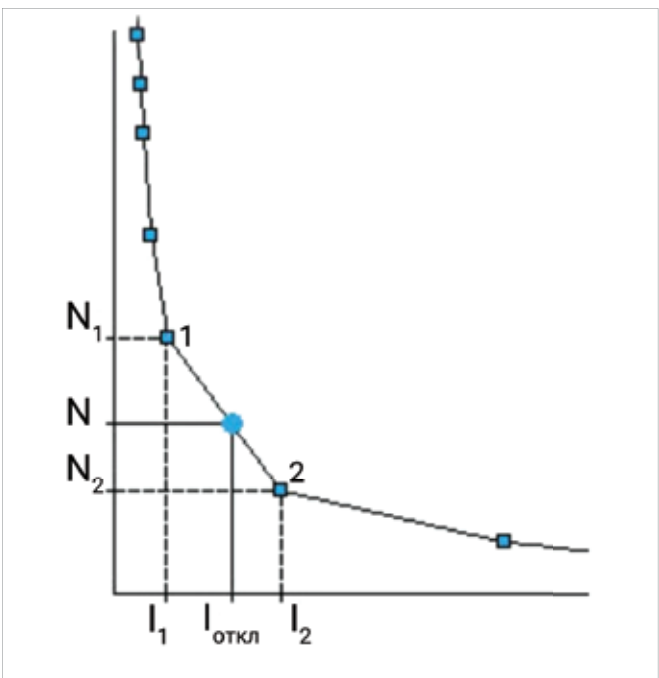


Рис. 2. Определение количества отключений при известном токе отключения

$$B_k = \sum_{k=1}^N |I_k|^n * \Delta t, \quad (7)$$

где I_k — измеренные значения тока полюса;

$\Delta t = t_{k+1} - t_k$ — время между соседними измерениями;

N — общее число отсчетов за время отключения;

n — показатель степени (для интеграла Джоуля используется квадрат мгновенного значения тока).

В выключателях КЭПС-ВВС используется измерительная система, построенная на базе комбинированных датчиков тока и напряжения с применением поясов Роговского. В процессе работы регистратор непрерывно измеряет токи фаз выключателя с частотой 5 кГц. Фиксируются данные 2000 измерений в течение 200 мс.

Интегрирование производится за фактический период времени от момента подачи команды на отключение до момента погасания дуги, таким образом, конкретный тип и уставка релейной защиты не оказывают влияние.

Следует отметить, что при токах ниже номинального устойчивая дуга не возникает и износ выключателя пренебрежимо мал. Поэтому при оценке накопленного износа учитываются только операции с током, превышающим номинальный.

Аналогичный подход можно применить и для учета энергии, выделяющейся при включении выключателя на короткое замыкание. Однако подобные ситуации, ведущие к существенному потреблению ресурса, крайне редки. Основной износ элементов дугогасящего устройства происходит именно при операциях отключения, что делает количество и энергетику этих операций ключевой характеристикой коммутационного ресурса.

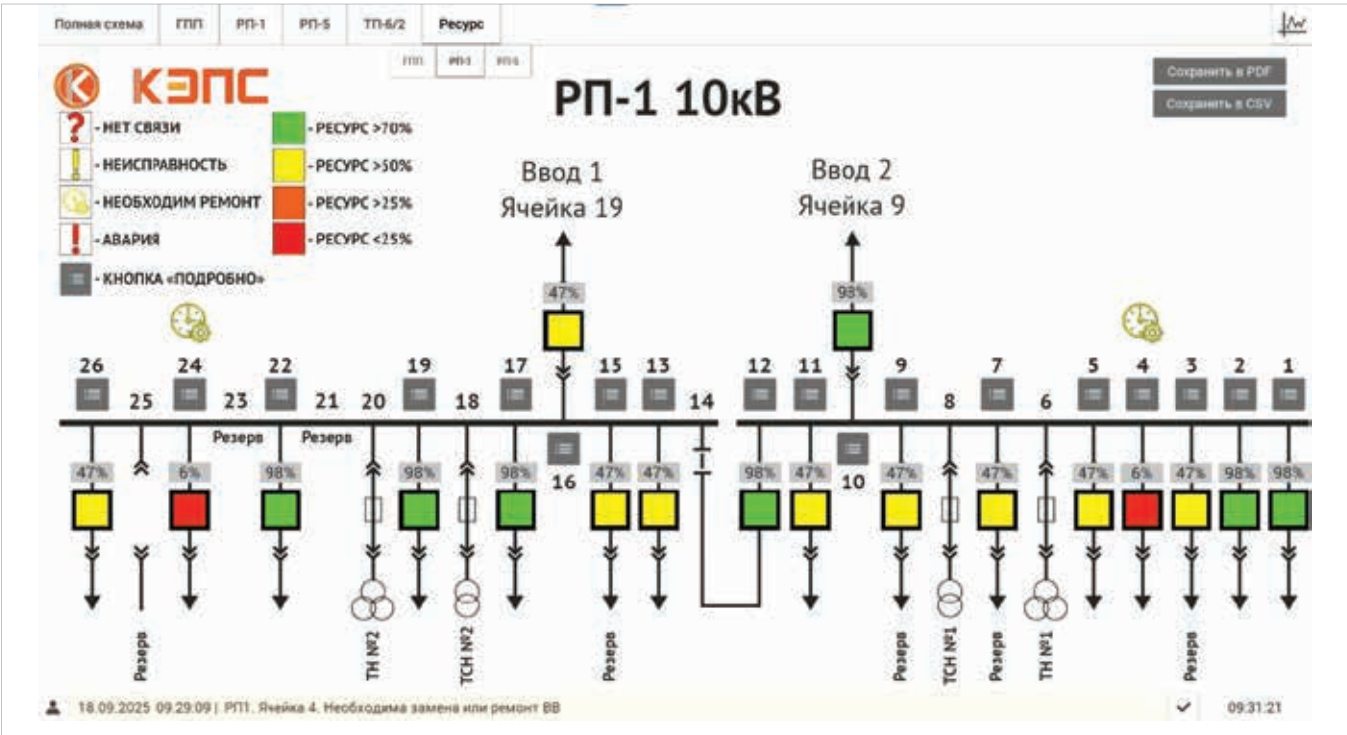


Рис. 3. Главное окно программного обеспечения мониторинга коммутационного ресурса выключателей

Таким образом, возможно сформировать математическое выражение (8), позволяющее рассчитать долю термического воздействия произвольного тока отключения на контактную систему выключателя B_{ki} по отношению к воздействию при коммутации номинального тока отключения $I_{ном\ откл}$. Это позволяет перейти от учета простого количества операций коммутации к взвешенному учету их реальной «энергетической тяжести»:

$$\frac{B_{ki}}{B_{k\ ном}} = \frac{B_{ki}}{(I_{ном\ откл})^2 t_{полн\ откл}}. \tag{8}$$

Если принять, что ресурс по коммутационной стойкости $R_{ном\ откл}$ выключателя определяется количеством отключений номинального тока отключения $I_{ном\ откл}$ и одно отключение такого тока приводит к израсходованию одной единицы ресурса, то отключение с произвольным током и временем протекания расходует долю единицы ресурса выключателя. Допущение о том, что одно отключение номинального тока расходует одну единицу ресурса, является условным определением единицы ресурса и базируется на паспортных данных выключателя, где указывается ресурс как количество отключений номинального тока.

При каждом отключении выключателя для всех фаз вычисляют величину текущего сработавшего ресурса $R_{i\ откл}^{фазы}$.

$$R_{i\ откл}^{фазы} = \frac{B_{ki}}{(I_{ном\ откл})^2 t_{полн\ откл}}. \tag{9}$$

Выражения (8) и (9) основаны на физическом принципе, что основной причиной деградации контактов является тепловое воздействие электрической дуги. Энергия дуги пропорциональна произведению квадрата тока и времени его протекания, что выражается через интеграл Джоуля. Нормирование по номинальному интегралу Джоуля позволяет перейти от абсолютных значений энергии к относительным единицам ресурса. Таким образом, отношение фактического значения к номинальному значению интеграла Джоуля представляет именно сработавшую долю ресурса при данной операции.

Значения $I_{ном\ откл}$, $t_{полн\ откл}$ принимаются по паспортным характеристикам коммутационного аппарата, значение B_{ki} определяется по осциллограммам встроенного регистратора вакуумного выключателя синхронного типа КЭПС-ВВС.

Величину $R_{i\ откл}^{фазы}$ суммируют нарастающим итогом для каждой фазы:

$$R_{\Sigma\ откл}^{фазы} = \sum_i^n R_{i\ откл}^{фазы}, \tag{10}$$

где n — число выполненных отключений.

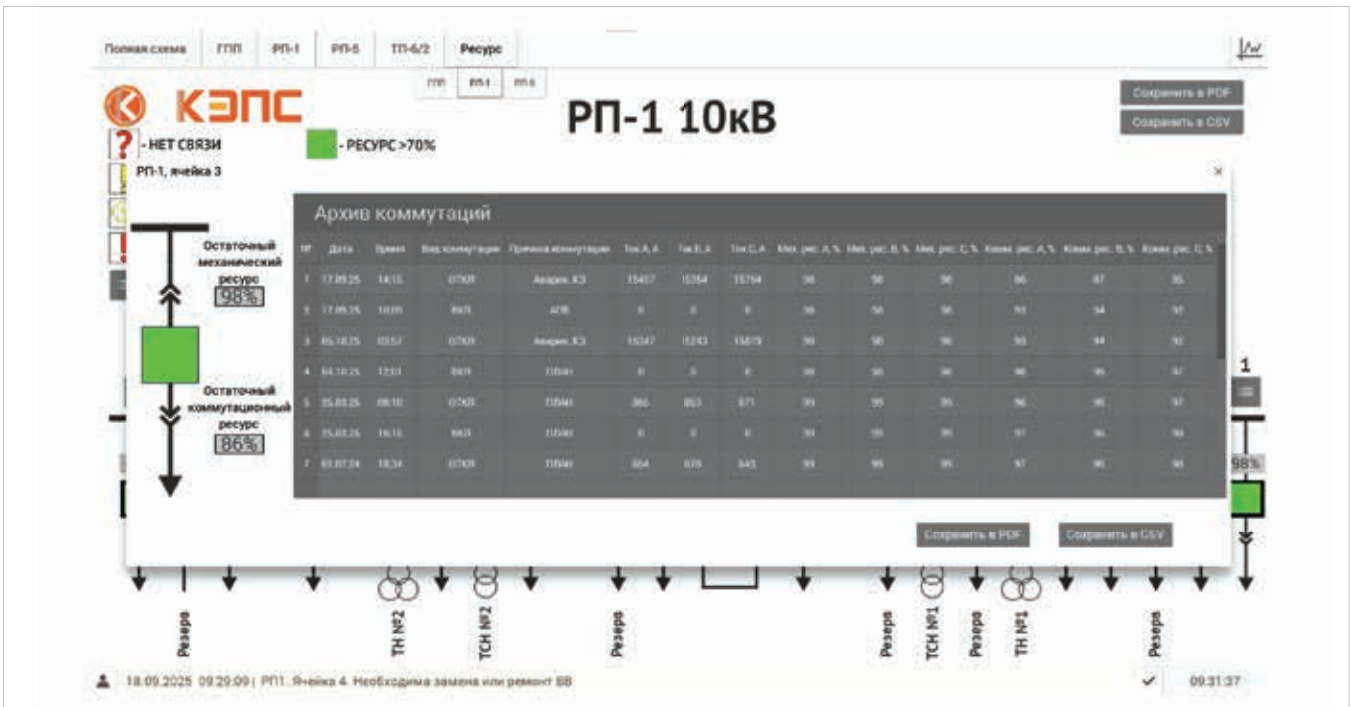


Рис. 4. Окно данных о ресурсе отдельного выключателя программного обеспечения мониторинга коммутационного ресурса выключателей

Нарастающий итог $R_{\Sigma\ откл}^{фазы}$ является сработанным ресурсом для каждой фазы выключателя. При коммутации фаз выключателя свое значение текущего тока коммутации и свое тепловое воздействие есть у каждой фазы, поэтому вычисление сработавшего ресурса осуществляется для каждой фазы отдельно.

Остаточный ресурс выключателя $R_{ост}$ оценивается по значению сработавшего ресурса наиболее изношенной фазы

$$R_{ост} = R_{ном\ откл} - R_{\Sigma\ откл\ max}^{фазы}, \tag{11}$$

где $R_{ном\ откл}$ — ресурс коммутационной стойкости выключателя при номинальном токе отключения по паспортным данным аппарата; $R_{\Sigma\ откл\ max}^{фазы}$ — сработанный ресурс наиболее изношенной фазы выключателя.

При приближении $R_{ост}$ к нулю принимается решение о выводе выключателя в ремонт.

ЦЕНТРАЛИЗОВАННАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА КОММУТАЦИОННОГО РЕСУРСА ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ

Развитием предложенной методологии является разработка специализированного программного обеспечения, предназначенного для централизованного учета и комплексного мониторинга коммутационного ресурса вакуумных выключателей синхронного типа КЭПС-ВВС. Данное программное обеспечение позволяет перейти к созданию целостной

картины технического состояния всего парка выключателей этого типа, установленных на подстанциях предприятия (рис. 3, 4).

Для визуального восприятия текущее состояние выключателя выделено цветовой индикацией. Зеленый цвет сигнализирует о хорошем состоянии (износ до 30 % номинального коммутационного ресурса), желтый — об удовлетворительном (износ до 50 %), оранжевый — о приближении к порогу технического обслуживания (износ до 75 %), красный — о критическом истощении ресурса (износ выше 75 %). Такая визуализация позволяет быстро оценить техническое состояние аппарата и принять своевременное решение о его обслуживании или замене. Предложенная система цветовой индикации уровней остаточного ресурса является адаптацией методики оценки технического состояния, установленной Министерством энергетики РФ в приказе № 676 [11].

Внедрение централизованной системы мониторинга позволяет перейти к проактивной стратегии обслуживания, основанной на данных о фактическом состоянии каждого аппарата. Интеграция с интеллектуальными выключателями КЭПС-ВВС, оснащенными встроенными регистраторами параметров коммутации, открывает следующие возможности.

1. Мониторинг в режиме реального времени. Ответственный эксплуатационный персонал электросетевой организации или главный энергетик предприятия получают возможность удаленно в режиме реального времени отслеживать текущее и прогнозное состояние выключателей. Это позволяет принимать более обоснованные решения о дальнейшей эксплуатации оборудования.

2. Усовершенствованный расчет ресурса. Методика определения ресурса учитывает реальное энергетическое воздействие по значению интеграла Джоуля для каждой операции коммутации, что обеспечивает более высокую точность определения остаточного коммутационного ресурса выключателя.
 3. Централизация и аналитика. Данные по всем выключателям консолидируются в единой системе. Это предоставляет руководству и техническим специалистам дополнительный аналитический инструмент:
 - формирование сводных отчетов по всему парку выключателей с возможностью сортировки и фильтрации;
 - визуализация состояния через цветовую индикацию;
 - автоматическое формирование оповещений о необходимости проведения технического обслуживания или ремонта конкретного выключателя.
 4. Удобство и целевой подход. Программное обеспечение разработано для работы с данными, поступающими от выключателей, что обеспечивает удобство для пользователя. Для работы не требуется установка дополнительного оборудования на каждую ячейку распределительного устройства подстанции.
- Внедрение данного специализированного программного обеспечения позволяет создать целостную, автоматизированную систему управления ресурсом вакуумных выключателей КЭПС-ВВС, обеспечивающую повышение надежности электроснабжения и оптимизацию затрат на их техническое обслуживание.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ существующих методик оценки коммутационного ресурса высоковольтных выключателей выявил их ключевой недостаток — ориентацию на номинальные параметры коммутации и отсутствие учета реального энергетического воздействия на контактную систему при каждой операции. Большинство рассмотренных подходов не позволяет осуществить точный мониторинг износа в режиме реального времени и требует значительных трудозатрат от персонала.

Предложена методика определения и мониторинга остаточного коммутационного ресурса, фундаментальным отличием которой является переход от учета количества операций к взвешенному учету их реального энергетического воздействия. В основе методики лежит расчет доли износа, вызываемой каждой операцией отключения, на основе значения интеграла Джоуля, определяемого по фактическим осциллограммам тока отключения и времени его протекания. Это позволяет с более высокой точностью оценить вклад каждой коммутации в общий износ контактной системы.

Достоинством предложенного подхода является его практическая реализуемость благодаря использованию данных со встроенных регистраторов современных вакуумных выключателей синхронного типа КЭПС-ВВС. Это исключает необходимость установки дополнительного диагностирующего оборудования.

Разработка позволяет существенно повысить надежность работы распределительных сетей среднего напря-

жения за счет перехода от планово-предупредительной системы ремонтов к проактивной стратегии, основанной на точных данных. Это способствует оптимизации затрат на техническое обслуживание выключателей, предотвращению внезапных отказов.

Рисунки к статье предоставлены авторами.

↓ ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р 52565–2006 Выключатели переменного тока на напряжения от 3 до 750 кВ. Общие технические условия. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gosthelp.ru/gost/gost691.html> (Дата обращения: 01.06.2025).
2. Андреев Д.А., Назарьев И.А. Анализ методов оценки коммутационного ресурса высоковольтных выключателей // Вестник ИГЭУ. 2008. № 2. С. 1-15.
3. Коммутационный ресурс и ток отключения выключателя. [Электронный ресурс]. URL: <http://energetik22.ru/kommutacionnyj-i-tok-otklyucheniya-vyklyuchatelya/> (Дата обращения: 15.06.2025).
4. IEC TR 62271-310 High-voltage switchgear and controlgear - Part 310: Electrical endurance testing for circuit-breakers of rated voltage 72,5 kV and above. [Электронный ресурс]. URL: http://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:20:0:::FSP_ORG_ID,FSP_LANG_ID:1402,25 (Дата обращения: 01.06.2025).
5. Учет остаточного ресурса высоковольтных выключателей. [Электронный ресурс]. URL: https://digital.runeft.ru/6_2020/mtrele (Дата обращения: 06.06.2025).
6. Методические указания по определению расхода коммутационного ресурса выключателей при эксплуатации. М.: ОРГРЭС, 1992.
7. Документация на программное обеспечение / Производственное объединение «ГОСАН», Москва. [Электронный ресурс]. URL: <https://gosan.ru/taxonomy/term/11> (Дата обращения: 06.06.2025).
8. Пильщиков В.Е. Алгоритм определения состояния объекта по комплексу измеряемых параметров // Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования. Вып. 11. СПб., 2000. С. 260-263.
9. Экспертные системы. [Электронный ресурс]. URL: <http://vibrocenter.ru/expert.htm> (Дата обращения: 06.06.2025).
10. Выкумный выключатель синхронного типа КЭПС-ВВС. [Электронный ресурс]. URL: <https://keps.pro/catalog/vakuumnye-vyklyuchately/vakuumnyy-vyklyuchatel-sinkhronnogo-tipa/> (Дата обращения: 12.09.2025).
11. Приказ Министерства энергетики Российской Федерации № 676 от 26.07.2017 «Об утверждении методики оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей» (с изменениями на 17 марта 2020 г.). [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456088008> (Дата обращения: 06.10.2025).