

Оценка надежности выключателей в схемах распределительных устройств с различной топологией

НАЗАРЫЧЕВ А.Н.

СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия

СУЛЫНЕНКОВ И.Н.

ИГЭУ, Иваново, Россия

Рассматриваются вопросы, связанные с оценкой надежности высоковольтных выключателей в схемах распределительных устройств с различной топологией их построения. Представлена обобщенная формула, позволяющая провести расчеты и дальнейшую оценку зависимости параметра потока отказов выключателей от схемы распределительного устройства, в котором установлен выключатель. Для выявления топологических особенностей проведен анализ типовых схем распределительных устройств, представленных в нормативных документах. Выявлено пять основных типов топологий построения схем и типов выключателей в зависимости от типа коммутируемых присоединений. Для сопоставительных расчетов для каждого типа топологии схемы выбрано по одному характерному варианту. Представлено распределение выключателей в этих схемах по типам. Проведены расчеты частоты отказов выключателей в схемах при одинаковых исходных данных с разбивкой по типам. Представлены выводы о степени влияния схем различного типа на надежность высоковольтных выключателей как в целом, так и отдельно в зависимости от типа коммутируемого присоединения.

К л ю ч е в ы е с л о в а: *схема распределительного устройства, топология, выключатель, частота отказов*

Распределительные устройства (РУ) предназначены для приема электрической энергии и ее распределения по отходящим присоединениям. Энергообъекты имеют в своем составе несколько таких устройств различного класса напряжения и преимущественно выполняются из типовых ячеек, в состав которых входит однотипное оборудование. Сами ячейки объединяются участками шин или ошиновками, определяющими топологические особенности построения схем РУ.

Надежность схемы РУ в значительной степени зависит от оборудования, входящего в его состав. Среди оборудования стоит выделить высоковольтные выключатели [1], в наибольшей степени оказывающие влияние на число аварийных случаев в схемах [2].

Безотказность выключателей зависит от условий эксплуатации. Одним из важных факторов, влияющих на повреждаемость выключателей, является число выполняемых операций коммутации [3], напрямую связанное с топологией РУ. Причем усложнение конфигурации схемы, установка дополнительных выключателей приводят к увеличению числа включений и отключений. В результате повышается вероятность отказов выключателей.

Одним из наиболее значимых показателей, характеризующих безотказность выключателей, является частота отказов. Для ее определения применяют модели отказов [4], которые по мере развития теории на-

дежности усложнялись. В работах [3–9] представлены основные типы моделей отказов выключателей. Их несовершенство заключается в том, что они не учитывают топологические особенности построения РУ. В работах [10, 11] авторами выполнены исследования по оценке зависимости надежности высоковольтных выключателей от схемы РУ. Представлены формулы для вычисления частоты отказов этих аппаратов, проведен анализ влияния различных схемных факторов на надежность выключателей. При этом определение степени зависимости частоты отказов от топологии схемы РУ не проводилось. Этот вопрос представляет собой научный и практический интерес, решение которого представлено в данной статье.

Модель отказов выключателей с учетом условий и режимов их эксплуатации в различных схемах РУ. Выключатели в схемах РУ выполняют различное число операций включения-отключения. В большей степени это число определяется типом коммутируемых присоединений. Кроме того, выключатель должен выполнять резервные функции, производя коммутации при отказах смежных выключателей. Под понятием «выключатель, смежный к рассматриваемому», понимается выключатель, автоматически отключаемый устройствами резервирования при отказе рассматриваемого выключателя (УРОВ) или отключаемый вручную, если отказ рассматриваемого выключателя не приводит к

действию УРОВ. Согласно [10] расчет частоты отказов выключателей основан на решении системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), которая в общем виде записывается:

$$\begin{cases} \omega_{B1} = \omega_{B1HE3} + a_{\Sigma} p_{12} \omega_{B2} + a_{\Sigma} p_{13} \omega_{B3} + \dots + a_{\Sigma} p_{1m} \omega_{Bm}; \\ \omega_{B2} = \omega_{B2HE3} + a_{\Sigma} p_{21} \omega_{B1} + a_{\Sigma} p_{23} \omega_{B3} + \dots + a_{\Sigma} p_{2m} \omega_{Bm}; \\ \dots \dots \dots \\ \omega_{Bn} = \omega_{BnHE3} + a_{\Sigma} p_{n1} \omega_{B1} + a_{\Sigma} p_{n2} \omega_{B2} + \dots + a_{\Sigma} p_{nm} \omega_{Bm}, \end{cases} \quad (1)$$

где $\omega_{B1}, \omega_{B2}, \omega_{B3}, \dots, \omega_{Bn}, \omega_{Bm}$ – полные (с учетом схемы РУ) значения частот отказов первого, второго, третьего ... n -го, m -го выключателей; $\omega_{B1HE3}, \omega_{B2HE3}, \dots, \omega_{BnHE3}$ – независимые составляющие частот отказов первого, второго, ..., n -го выключателей от отказов смежных выключателей; $p_{12}, p_{13}, p_{1m}, p_{21}, p_{23}, p_{2m}, p_{n1}, p_{n2}, p_{nm}$ (общая форма записи p_{ij}) – параметры, каждый из которых равен единице, если выключатель i отключается действием УРОВ при отказе выключателя j , и нулю, если выключатель i не отключается действием УРОВ при отказе выключателя j ; a_{Σ} – относительная частота отказов в результате отказов выключателей, смежных к рассматриваемому.

Использование СЛАУ (1) для оценки влияния топологии схемы РУ на безотказность выключателей является затруднительным. Поэтому (1) необходимо решить для частных примеров схем, найти общие закономерности и при наличии возможности вывести общее уравнение. Для этого проведены расчеты частоты отказов выключателя в общем виде для типовых схем РУ [12]. Результаты расчетов приведены в [10, 11]. Рассмотрим вывод общего уравнения на примере схемы (рис. 1).

Для решения (1) применим метод Гаусса и рассмотрим случай раздельной работы секций в схеме (рис. 1). Для упрощения процесса поиска решения примем число выключателей присоединений, подключенных к одной секции, равным трем. Матрица для решения СЛАУ методом Гаусса и система уравнений (1) примут вид:

$$\begin{cases} \omega_{B1} - a_{\Sigma} \omega_{B2} - a_{\Sigma} \omega_{B3} = \omega_{B1HE3}; \\ -a_{\Sigma} \omega_{B1} + \omega_{B2} - a_{\Sigma} \omega_{B3} = \omega_{B2HE3}; \\ -a_{\Sigma} \omega_{B1} - a_{\Sigma} \omega_{B2} + \omega_{B3} = \omega_{B3HE3}; \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} 1 & -a_{\Sigma} & -a_{\Sigma} \\ -a_{\Sigma} & 1 & -a_{\Sigma} \\ -a_{\Sigma} & -a_{\Sigma} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_{B1HE3} \\ \omega_{B2HE3} \\ \omega_{B3HE3} \end{pmatrix}.$$

Обозначим независимые составляющие частоты отказов выключателей ω_{B1HE3} в виде ω_i . Преобразуем систему (2), исключая переменную ω_{B1} из всех уравнений, кроме первого. В результате получим:

$$\begin{pmatrix} 1 & -a_{\Sigma} & -a_{\Sigma} \\ 0 & (1-a_{\Sigma})(1+a_{\Sigma}) & -a_{\Sigma}(1+a_{\Sigma}) \\ 0 & -a_{\Sigma}(1+a_{\Sigma}) & (1-a_{\Sigma})(1+a_{\Sigma}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 + a_{\Sigma} \omega_1 \\ \omega_3 + a_{\Sigma} \omega_1 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Далее исключаем переменную ω_{B2} из третьего уравнения и в результате получим:

$$\begin{pmatrix} 1 & -a_{\Sigma} & -a_{\Sigma} \\ 0 & (1-a_{\Sigma})(1+a_{\Sigma}) & -a_{\Sigma}(1+a_{\Sigma}) \\ 0 & 0 & \frac{(1-2a_{\Sigma})(1+a_{\Sigma})}{1-a_{\Sigma}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 + a_{\Sigma} \omega_1 \\ \omega_3 + a_{\Sigma} \omega_1 + \frac{a_{\Sigma}}{1-a_{\Sigma}} (\omega_2 + a_{\Sigma} \omega_1) \end{pmatrix}. \quad (4)$$

В третьей строке матрицы (4) получено решение для определения частоты отказов выключателя В3:

$$\omega_{B3} = \frac{1-a_{\Sigma}}{(1+a_{\Sigma})(1-2a_{\Sigma})} \left(\omega_3 + \frac{a_{\Sigma}}{1-a_{\Sigma}} (\omega_2 + \omega_1) \right). \quad (5)$$

Уравнение для определения частоты отказов для выключателя В2 получаем подстановкой уравнения для переменной выключателя В3 во второе уравнение преобразованной матрицы (4), а для выключателя В1 – подстановкой уравнений для переменных выключателей В2 и В3 в первое уравнение матрицы (4). Тогда решение для выключателя В2 примет вид:

$$\omega_{B2} = \frac{1-a_{\Sigma}}{(1+a_{\Sigma})(1-2a_{\Sigma})} \left(\omega_1 + \frac{a_{\Sigma}}{1-a_{\Sigma}} (\omega_2 + \omega_3) \right). \quad (6)$$

Из полученного уравнения для определения частоты отказов выключателя В2 (6) видно, что оно аналогично уравнению для выключателя В3 (5). Идентичное решение будет для выключателя В1. При решении матрицы (2) в общем виде выявлены две закономерности:

1. Уравнение для элемента, расположенного на главной диагонали матрицы, после очередного i шага преобразования примет вид:

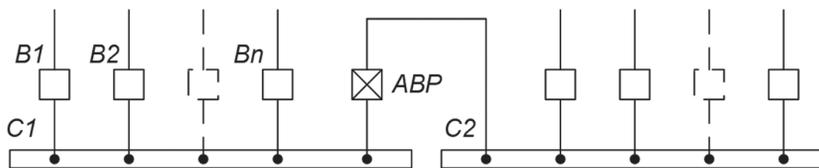


Рис. 1. Схема с одной рабочей системой шин, секционированной выключателем
 Fig. 1. Scheme «One working, sectioned by circuit breaker, bus system»

$$K_{Di} = \frac{(1+a_{\Sigma})(1-(i-1)a_{\Sigma})}{1-(i-2)a_{\Sigma}}.$$

2. После i -шага преобразования в уравнения для определения частоты отказов выключателей от $(i+1)$ до последнего входят значения независимой частоты отказов выключателей от первого до i -го включительно составляющими

$$\omega_{ВНЕЗ} \frac{a_{\Sigma}}{1-(i-1)a_{\Sigma}}.$$

Полученные закономерности характерны для всех схем РУ, что дает возможность преобразовать систему уравнения к общему решению. Для схемы, приведенной на рис. 1, уравнение для определения частоты отказов выключателей примет вид:

$$\omega_{Bk} = 1/K_{Dn} \left(\omega_{ВНЕЗ} + \frac{a_{\Sigma}}{1-(n-2)a_{\Sigma}} \sum_{i=1, i \neq k}^n \omega_{ВНЕЗ} \right). \quad (7)$$

После решения систем уравнений вида (1) для всех типовых РУ [12] разработан общий подход по решению СЛАУ. Он позволил сформулировать универсальное решение для любого выключателя любой схемы РУ независимо от конфигурации:

1. В полных частотах отказов выключателей необходимо учитывать независимые составляющие частоты отказов других выключателей с относительной частотой отказов в результате отказов выключателей, смежных к рассматриваемому выключателю, только в первой и во второй степенях. Слагаемые уравнения с относительной частотой отказов в результате отказов выключателей, смежных к рассматриваемому выключателю, в третьей, четвертой и больших степенях на несколько порядков меньше, чем слагаемые в первой степени.

2. При решении СЛАУ в первую очередь следует исключить переменные для выключателей, которые объединяют в РУ одно присоединение и узел схемы. Далее подлежат исключению переменные для выключателей, которые объединяют в РУ два узла или два присоединения.

3. Вывод общего уравнения для элемента, расположенного на главной диагонали матрицы, для выключателей, которые объединяют в РУ два узла или два присоединения, возможен при выполнении следующих действий. Рассмотрим их для схемы, представленной на рис. 1. Пусть секции РУ работают параллельно, число присоединений к каждой секции примем равным двум. Матрица для решения системы уравнений методом Гаусса имеет вид:

$$\left(\begin{array}{ccccc|c} 1 & -a_{\Sigma} & -a_{\Sigma} & 0 & 0 & \omega_1 \\ -a_{\Sigma} & 1 & -a_{\Sigma} & 0 & 0 & \omega_2 \\ -a_{\Sigma} & -a_{\Sigma} & 1 & -a_{\Sigma} & -a_{\Sigma} & \omega_3 \\ 0 & 0 & -a_{\Sigma} & 1 & -a_{\Sigma} & \omega_4 \\ 0 & 0 & -a_{\Sigma} & -a_{\Sigma} & 1 & \omega_5 \end{array} \right). \quad (8)$$

Выполним преобразования для третьего уравнения матрицы (8), используя подходы 1 и 2 по решению СЛАУ, а также закономерности 1 и 2. При исключении двух первых переменных получим:

$$\left(\begin{array}{ccccc|c} 1 & -a_{\Sigma} & -a_{\Sigma} & 0 & 0 & \\ -a_{\Sigma} & 1 & -a_{\Sigma} & 0 & 0 & \\ 0 & 0 & \frac{(1-2a_{\Sigma})(1+a_{\Sigma})}{1-a_{\Sigma}} & -a_{\Sigma} & -a_{\Sigma} & \\ 0 & 0 & 1-a_{\Sigma} & 1 & -a_{\Sigma} & \\ 0 & 0 & -a_{\Sigma} & -a_{\Sigma} & 1 & \\ & & -a_{\Sigma} & & & \\ & \omega_1 & & & & \\ & \omega_2 & & & & \\ \omega_3 + \frac{a_{\Sigma}}{1-a_{\Sigma}}(\omega_2 + \omega_1) & & & & & \\ & \omega_4 & & & & \\ & \omega_5 & & & & \end{array} \right). \quad (9)$$

На следующем этапе из уравнения для секционного выключателя следует исключить переменные для четвертого и пятого выключателей. При простом продолжении вычислений по алгоритму решения методом Гаусса получить универсальное решение для элемента матрицы, который стоит на главной диагонали в третьей строке, не представляется возможным.

Авторами предлагается другой подход, позволяющий получить уравнение, идентичное ранее полученному уравнению для схемы без выключателей, коммутирующих два узла или два присоединения. Суть подхода заключается в следующем. Запомним значение элемента матрицы, который стоит на главной диагонали в третьей строке, и примем его значение вновь равным единице. После выполнения всех преобразований добавим запомненное значение к общему результату и вычтем единицу. Такой прием не изменит конечного решения, так как с элементом матрицы, который стоит на главной диагонали в третьей строке, далее будут выполняться только операции сложения. Используя такой прием и выполнив дальнейшие преобразования для третьей строки матрицы (9) с учетом выявленных ранее закономерностей, получим третью строку:

$$\left(0 \quad 0 \quad K_D \quad 0 \quad 0 \mid \omega_3 + \frac{a_{\Sigma}}{1-a_{\Sigma}}(\omega_1 + \omega_2) + \frac{a_{\Sigma}}{1-a_{\Sigma}}(\omega_4 + \omega_5) \right).$$

Элемент матрицы, который стоит на главной диагонали в третьей строке, может быть вычислен по формуле:

$$K_D = \frac{(1+a_{\Sigma})(1-(n-1)a_{\Sigma})}{1-(n-2)a_{\Sigma}} + \frac{(1+a_{\Sigma})(1-(k-1)a_{\Sigma})}{1-(k-2)a_{\Sigma}} - 1.$$

Оценим значение коэффициента K_d . Он монотонно возрастает с увеличением относительной частоты отказов в результате отказов выключателей, смежных к рассматриваемому, и числа выключателей n и k , подключенных к узлам схемы, коммутируемым рассматриваемым выключателем. Диапазон изменения коэффициента K_d составляет $1 \div 1,0052$. В работе [10] показано, что при расчетах следует принять $K_d = 1$. Погрешность в этом случае не превысит 1 %.

Уравнение для определения частоты отказов секционного выключателя схемы (рис. 1) при параллельной работе секций с числом присоединений к первой секции n и ко второй секции p с учетом допущения по коэффициенту K_d имеет вид:

$$\omega_{Bk} = \omega_{BkHEЗ} + \frac{a_{\Sigma}}{1 - (n-2)a_{\Sigma}} \sum_{i=1, i \neq k}^n \omega_{BHEЗ} + \frac{a_{\Sigma}}{1 - (p-2)a_{\Sigma}} \sum_{j=1, j \neq k}^p \omega_{BHEЗ}.$$

Полученные в [10] результаты позволили записать общую модель отказов выключателей, которая отличается от существующих моделей отказов учетом в частоте отказов топологических особенностей построения РУ:

$$\omega_{Bk} = \omega_{BkHEЗ} + \sum_{i=m_1, m_2} \left[\frac{a_{\Sigma}}{1 - (n_i - 2)a_{\Sigma}} \left[\left(\sum_{j=1}^{n_i} \omega_{B(j,i)HEЗ} \right) + \frac{a_{\Sigma}}{1 - (n_i - 2)a_{\Sigma}} \left(\sum_{p=1}^{n_s} \omega_{B(p,s)HEЗ} \right) - \omega_{B(j,i)HEЗ} \right] \right] - \omega_{BkHEЗ}, \quad (10)$$

где k, j, p – индексы выключателей в РУ; $(j, i), (p, s)$ – относительные номера выключателей j и p относительно узлов i и s ; m_1, m_2 – индексы узлов, которые объединяет k -й выключатель схемы РУ; только m_1 – индекс узла, к которому подключен k -й выключатель схемы РУ; n_i – количество выключателей, которые подключены к узлу i ; n_s – количество выключателей, которые подключены к узлу s .

Независимая частота отказов любого выключателя определяется по формуле:

$$\omega_{BHEЗ} = \omega_{CT} + a_{OP} N_{OP} + a_{ABT} N_{ABT}, \quad (11)$$

где ω_{CT} – частота отказов выключателя без проведения операций включения-отключения; a_{OP} – частота отказов в пересчете на одну операцию при проведении оперативных переключений; a_{ABT} – частота отказов в пересчете на одну операцию при автоматическом отключении КЗ; N_{OP}, N_{ABT} – действительное количество операций, проводимых выключателем за один год, при проведении оперативных переключений и при ликвидации КЗ соответственно.

Уравнение (10) является более простым эквивалентом системы уравнений (1) и универсальным. Оно может быть применено для расчета частоты отказов любого выключателя в схемах РУ и позволяет выполнить анализ степени влияния схемы РУ на частоту отказов выключателей.

Оценка надежности выключателей в зависимости от топологии РУ. Для выявления топологических особенностей проведен анализ типовых схем [12] с учетом рекомендаций [13] и подхода по оценке последствий отказов электрооборудования [14]. В результате известные топологии схем РУ предлагается разделить на пять типов:

- 1) простые (блоки, мостики);
- 2) однокольцевые (треугольник, четырехугольник, шестиугольник);
- 3) со сборными шинами с радиальным подключением присоединений (схемы с одной или двумя рабочими системами шин и их вариации);
- 4) со сборными шинами с подключением присоединений между двумя выключателями (схемы с тремя выключателями на два присоединения или четырьмя выключателями на три присоединения и их вариации, схема с коммутацией присоединений к сборным шинам через два выключателя);
- 5) со сборными шинами как с радиальным подключением присоединений, так и с подключением присоединений между двумя выключателями (гибридные схемы, сочетающие участки схем третьего и четвертого типов).

Для оценки влияния топологии схемы РУ на безотказность выключателей от каждого типа схем выбрано по одному варианту, а именно:

от схем первого типа – мостиковая схема с выключателями в цепях линий и ремонтной перемычкой со стороны линий (рис. 2), далее – первая схема;

от схем второго типа – «Шестиугольник» (рис. 3), далее – вторая схема;

от схем третьего типа – схема с одной рабочей, секционированной выключателем, и обходной системой шин (рис. 4), далее – третья схема;

от схем четвертого типа – схема с присоединением линий через два выключателя с подключением трансформаторов к системам шин (рис. 5), далее – четвертая схема;

от схем пятого типа – схема с одной рабочей системой шин, секционированной по числу трансформаторов, с подключением трансформаторов к секциям шин через развилку выключателей (рис. 6), далее – пятая схема.

В зависимости от вида присоединений, которые коммутируют выключатели в схемах РУ, можно выделить следующие типы аппаратов:

ТТВ – при коммутации выключателем двух трансформаторов;

ЛЛВ – при коммутации выключателем двух линий;

ШШВ – при коммутации выключателем двух секций или систем шин;

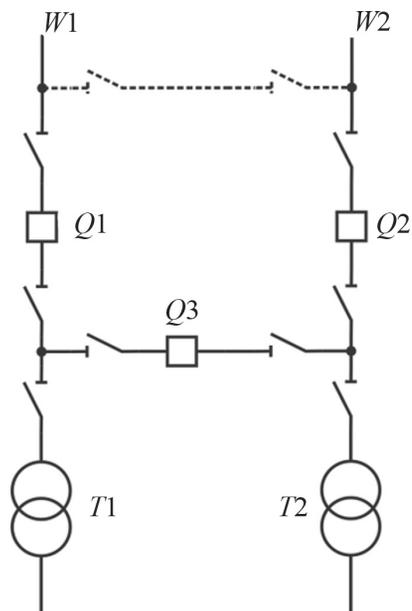


Рис. 2. Схема «Мостик с выключателями в цепях линий и ремонтной перемычкой со стороны линий»

Fig. 2. Scheme «Bridge with switches in the circuits of the lines and a repair jumper on the side of the lines»

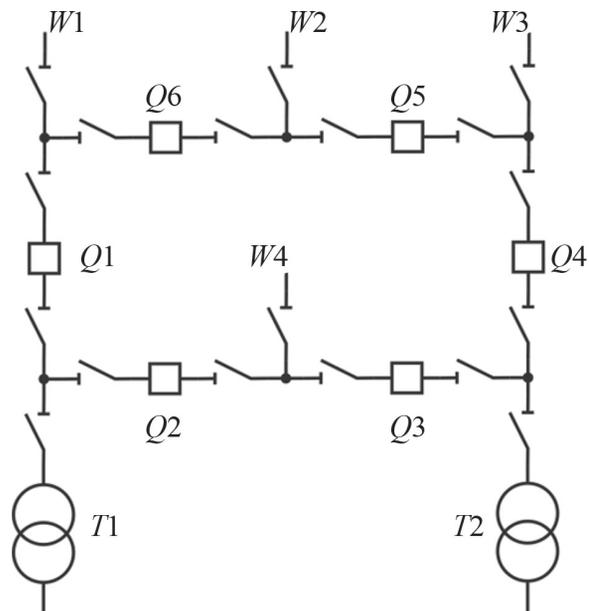


Рис. 3. Схема «Шестиугольник»

Fig. 3. Scheme «Hexagon»

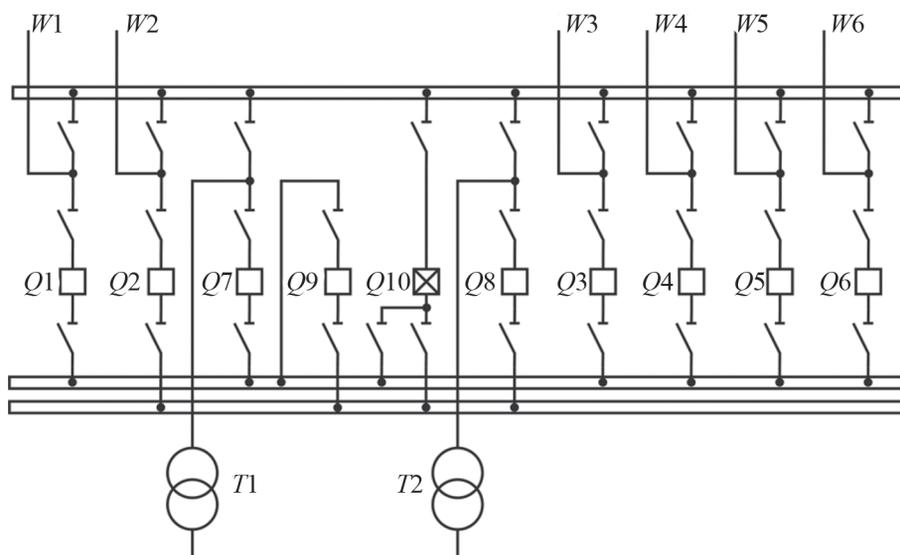


Рис. 4. Схема «Одна рабочая, секционированная выключателем, и обходная система шин»

Fig. 4. Scheme «One working, sectioned by circuit breaker and bypass bus system»

ТЛВ – при коммутации выключателем трансформатора и линии;

ЛШВ – при коммутации выключателем сборных шин и линии;

ТШВ – при коммутации выключателем шин и трансформатора.

Выключатели представленных выше схем (рис. 2–6) можно отнести к следующим типам:

ТТВ – выключатель Q_3 первой схемы;

ЛЛВ – выключатели Q_5, Q_6 второй схемы;

ШВ – выключатель Q_9 третьей схемы;

ТЛВ – выключатели Q_1, Q_2 первой схемы, Q_1-Q_4 второй схемы, выключатели Q_1-Q_{10} пятой схемы;

ЛШВ – выключатели Q_1-Q_6 третьей схемы, Q_1-Q_6 четвертой схемы;

ТШВ – выключатели Q_7-Q_8 третьей схемы, Q_7-Q_{10} четвертой схемы.

Для сравнения показателей надёжности выключателей проведены расчеты схем (рис. 2–6) с использованием одинаковых статистических данных, а именно: шины РУ напряжением 220 кВ, имеющие частоту отказов 0,013 раз в год на присоединение и частоту ремонтов 0,166 раз в год на присоединение;

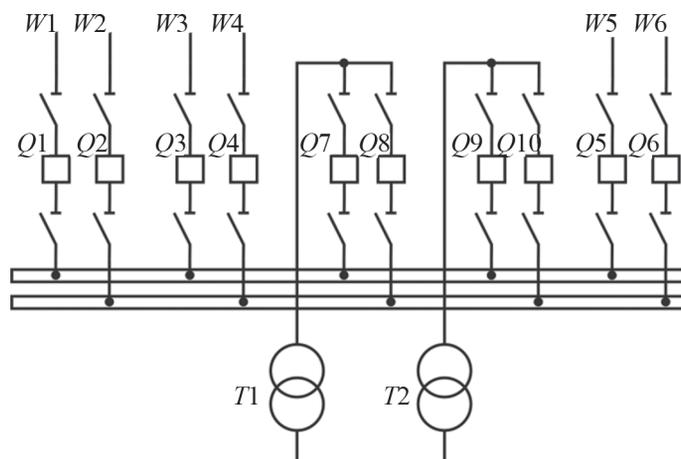


Рис. 5. Схема «Одна рабочая секционированная по числу трансформаторов система шин с подключением трансформаторов к секциям шин через развилку выключателей»

Fig. 5. Scheme «One working bus system sectioned according to the number of transformers with the connection of transformers to the bus sections through the junction of the switches»

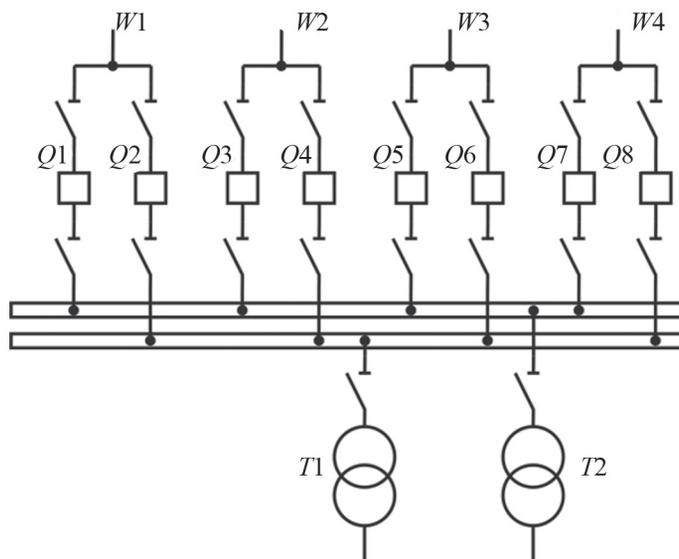


Рис. 6. Схема «Трансформаторы-шины с присоединением линий через два выключателя»

Fig. 6. Scheme «Bus-transformers with line connection via two switches»

силовой трансформатор номинальной мощностью 63000 кВ·А, имеющий частоту отказов 0,035 раз в год и частоту ремонтов 0,75 раз в год;

линии электропередачи воздушные длиной 100 км каждая с удельной частотой отказов в год на 100 км длины линии, равной 0,36, и частотой ремонтов 1,8 раз в год;

выключатели с частой отказов в статическом состоянии 0,002 раз в год и относительной частотой отказов в результате отказов выключателей, смежных к рассматриваемому выключателю, в диапазоне от 0 до 0,02 раз на операцию в год.

С использованием представленных данных проводился расчет частот отказов выключателей $\omega_{в}$ ТОП с учетом топологии схемы РУ (10) и частот отказов выключателей $\omega_{в}$ НЕ ТОП без учета топологии схемы РУ (11).

Сравнение полученных значений частот отказов выключателей, рассчитанных по (10) и (11), проводилось по выражению:

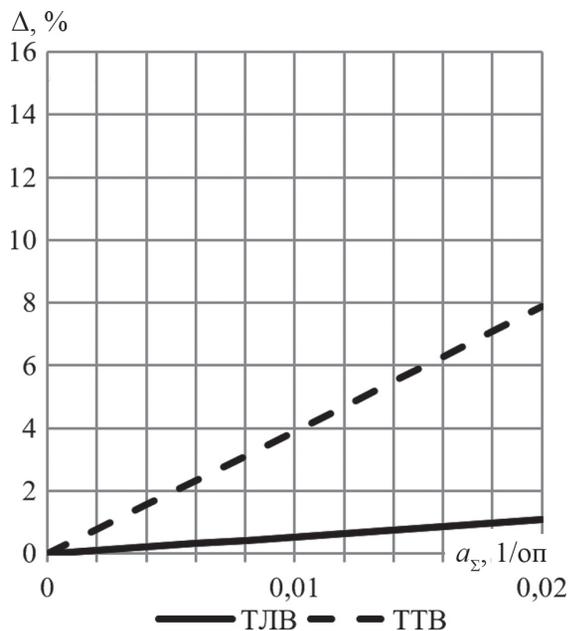
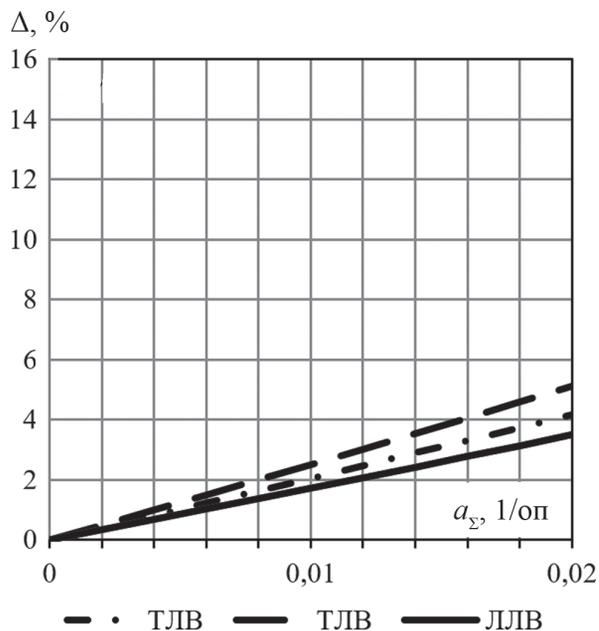
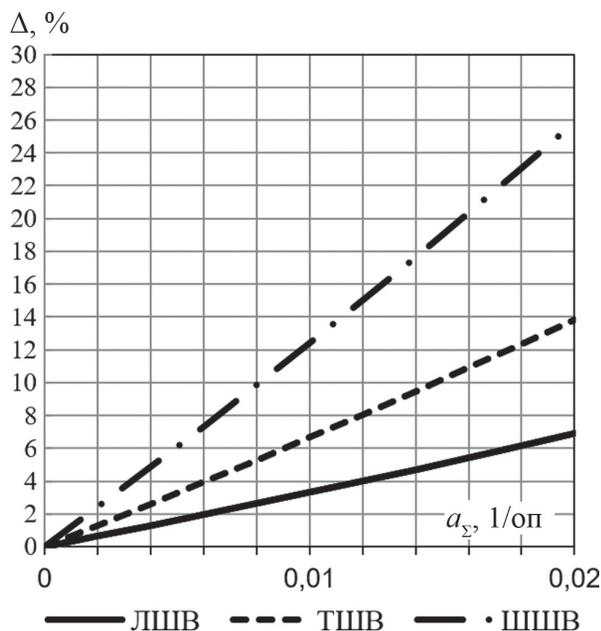
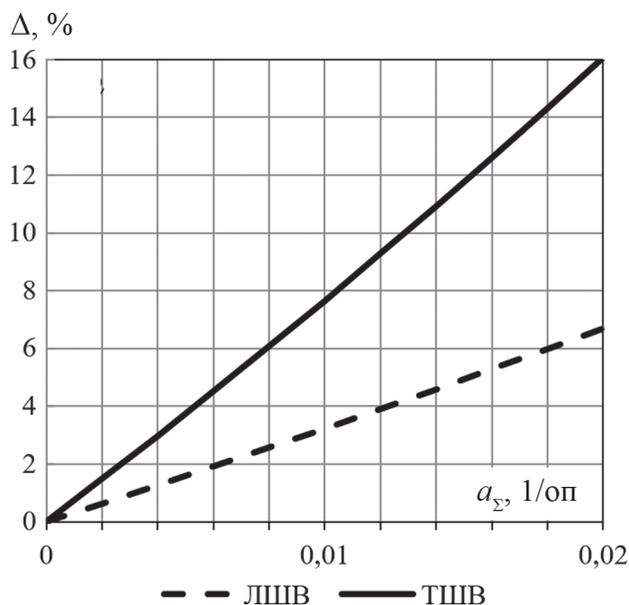
$$\Delta = \frac{\omega_{в\ \text{ТОП}} - \omega_{в\ \text{НЕ\ \text{ТОП}}}}{\omega_{в\ \text{НЕ\ \text{ТОП}}}} \cdot 100\%. \tag{12}$$

На рис. 7–11 представлены кривые изменения погрешности Δ при расчетах по двум моделям отказов выключателей.

По результатам анализа полученных зависимостей можно сделать следующие выводы.

Выводы.

1. Наибольшее влияние топология РУ оказывает на надежность выключателей в схемах, имеющих в своем составе сборные шины, с радиальным подключением

Рис. 7. Зависимость Δ от a_{Σ} для схемы рис. 2Fig. 7. Dependence of Δ on a_{Σ} for the scheme in Fig. 2Рис. 8. Зависимость Δ от a_{Σ} для схемы рис. 3Fig. 8. Dependence of Δ on a_{Σ} for the scheme in Fig. 3Рис. 9. Зависимость Δ от a_{Σ} для схемы рис. 4Fig. 9. Dependence of Δ on a_{Σ} for the scheme in Fig. 4Рис. 10. Зависимость Δ от a_{Σ} для схемы рис. 5Fig. 10. Dependence of Δ on a_{Σ} for the scheme in Fig. 5

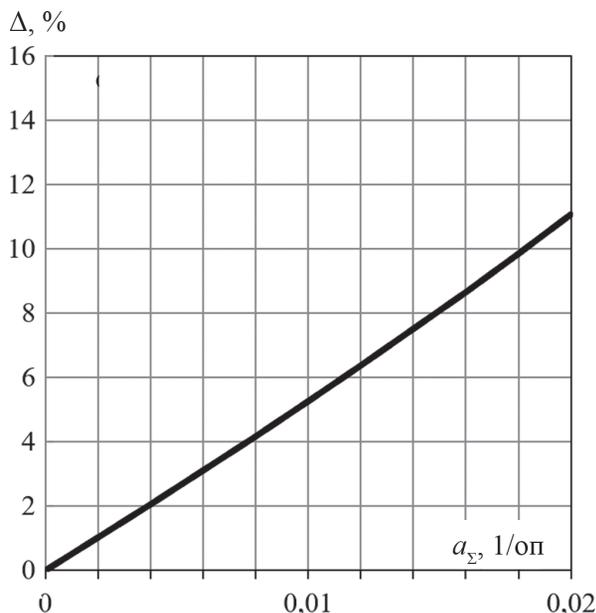
присоединений. Самое слабое влияние топология РУ оказывает на выключатели кольцевых схем.

2. Для однотипных выключателей ТШВ процентное изменение частоты отказов при учете схемы РУ примерно одинаково для схем третьего и четвертого типов (порядка 14 и 16 % соответственно при использовании воздушных выключателей с $a_{\Sigma} = 0,02$ 1/операцию).

3. Для однотипных выключателей ЛШВ процентное изменение частоты отказов при учете схемы РУ

примерно одинаково для схем третьего и четвертого типов (порядка 7 и 6,5 % соответственно при использовании воздушных выключателей с $a_{\Sigma} = 0,02$ 1/операцию).

4. Для однотипных выключателей ТЛВ наибольшее изменение частоты отказов характерно для схем пятого типа (≈ 11 % при использовании воздушных выключателей с $a_{\Sigma} = 0,02$ 1/операцию), меньше для схем первого типа (≈ 8 % при использовании воздушных выключа-

Рис. 11. Зависимость Δ от a_{Σ} для схемы рис. 6Fig. 11. Dependence of Δ on a_{Σ} for the scheme in Fig. 6

телей с $a_{\Sigma} = 0,02$ 1/операцию) и наименьшее для схем второго типа (4–5 % при использовании воздушных выключателей с $a_{\Sigma} = 0,02$ 1/операцию).

Проведенные расчеты по оценке надежности высоковольтных выключателей в схемах РУ объектов энергетики позволяют сформулировать следующие рекомендации:

в проектной практике при использовании нормативов [14, 15] следует применять дифференцированный подход к определению частоты отказов выключателей по модели (10) в зависимости от места выключателя в схеме РУ;

при новом проектировании и реконструкции схем РУ действующих объектов энергетики целесообразно учитывать полученные в ходе исследования результаты и выводы 1–4, особенно для схем, имеющих в своем составе сборные шины;

применение модели (10) дает более точную оценку надежности выключателей и позволяет учитывать различную степень влияния топологии схем РУ на их надежность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 52565-2006. Выключатели переменного тока на напряжения от 3 до 750 кВ. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2007, 87 с.

2. Розанов М.Н. Надежность электроэнергетических систем. Справочник. Т. 2. М.: Энергоатомиздат, 2000, 568 с.

3. Воробей Н.И. Надежность систем электроснабжения. Конспект лекций. Новосибирск: Наука, 2006, 205 с.

4. Надежность систем энергетики (сборник рекомендуемых терминов)/ Под ред. Н.И. Воробей. М.: ИАЦ «Энергия», 2007, 192 с.

5. Воробей Н.И. и др. Концепция обеспечения надежности в электроэнергетике. М.: ООО ИД «Энергия», 2013, 212 с.

6. Непомнящий В.А. Надежность оборудования энергосистем. М.: Изд-во журнала «Электроэнергия. Передача и распределение», 2013, 196 с.

7. Абдурахманов А.М., Мисриханов М.Ш., Шунтов А.В. Анализ моделей отказа выключателей в схемах коммутации электроустановок. – Электрические станции, 2007, № 4, с. 2–11.

8. Абдурахманов А.М. и др. Об особенностях структуры параметра потока отказов выключателя. – Электрические станции, 2005, № 5, с. 54–57.

9. Абдурахманов А.М. Разработка моделей надежности коммутационного оборудования и рекомендаций по их применению в задачах электроэнергетики: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: МЭИ (ТУ), 2008, 20 с.

10. Назарычев А.Н., Сулыненков И.Н., Таджибаев А.И. Оценка надежности выключателей распределительных устройств электрических станций и подстанций. СПб.: ДЕАН, 2018, 176 с.

11. Сулыненков И.Н. Совершенствование модели отказов выключателей распределительных устройств 35–750 кВ: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Иваново: ИГЭУ, 2013, 20 с.

12. СТО 56947007-29.240.30.010-2008. Схемы принципиальные электрические распределительных устройств подстанций напряжением 35-750 кВ. Типовые решения. М.: ОАО «ФСК ЕЭС», 2007, 132 с.

13. СО 153-34.20.118-2003. Методические рекомендации по проектированию развития энергосистем. М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2010, 56 с.

14. Назарычев А.Н. и др. Оценка последствий отказа асинхронных электродвигателей вследствие обрывов стержней короткозамкнутых обмоток роторов. – Электричество, 2021, № 9, с. 12–20.

[23.09.2021]



Авторы: Назарычев Александр Николаевич – доктор техн. наук, профессор кафедры «Электроэнергетика и электромеханика» Санкт-Петербургского горного университета, Санкт-Петербург, Россия.



Сулыненков Илья Николаевич – кандидат техн. наук, доцент кафедры «Электрические станции, подстанции и диагностика электрооборудования» Ивановского государственного энергетического университета имени В.И. Ленина, Иваново, Россия.

Reliability Assessment of Circuit Breakers in Switchgear Schemes with Different Topologies

NAZARYCHEV Aleksandr N. (Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia) – Professor of the Electrical Power Engineering and Electromechanics Dept., Dr. Sci. (Eng.).

SULYENKOV Il'ya N. (Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin, Ivanovo, Russia) – Docent of the Power Plants, Substations and Diagnostics of Electrical Equipment Dept., Cand. Sci. (Eng.).

The article discusses issues related to assessing the reliability of high-voltage circuit breakers in switchgear schemes with different topology of their design. A generalized formula is presented, using which it is possible to carry out calculations and further assessment of the failure flow parameter versus the switchgear scheme in which the circuit breaker is installed. To identify topological features, the standard switchgear schemes presented in the regulatory documents are analyzed. Five main types of circuit topologies and types of circuit breakers have been identified depending on the type of switched connections. For carrying out comparative calculations, one typical option was selected for each type of circuit topology. The distribution of circuit breakers by types in these schemes is presented. Calculations of the circuit breaker failure rates in schemes with the same initial data and with breaking down by types are carried out. Conclusions on the extent to which various types of schemes influence the reliability of high-voltage circuit breakers both as a whole and separately, depending on the type of switched connection are presented.

Key words: switchgear scheme, topology, circuit breakers, failure rate

REFERENCES

- GOST R 52565-2006.** *Vyklyuchateli peremennogo toka na napryazheniya ot 3 do 750 kV. Obshchie tekhnicheskie usloviya* (Alternating-Current Circuit-Brakers of Voltages from 3 to 750 kV. General Specifications). M.: Standartinform, 2007, 87 p.
- Rozanov M.N.** *Nadezhnost' elektroenergeticheskikh sistem. Spravochnik* (Reliability of electric power systems. Guide), vol. 2. M.: Energoatomizdat, 2000, 568 p.
- Voropay N.I.** *Nadezhnost' sistem elektrosnabzheniya. Konspekt lektsiy* (Reliability of Power Supply Systems. Lecture Notes). Novosibirsk: Nauka, 2006, 205 p.
- Nadezhnost' sistem energetiki (sbornik rekomenduemykh terminov)** (Reliability of Energy Systems (Collection of Recommended Terms)) / Under Ed. N.I. Voropay. M.: IATs «Energiya», 2007, 192 p.
- Voropay N.I., et al.** *Kontseptsiya obespecheniya nadezhnosti v elektroenergetike* (The Concept of Ensuring Reliability in the Electric Power Industry). M.: OOO ID «Energiya», 2013, 212 p.
- Nepomnyashchiy V.A.** *Nadezhnost' oborudovaniya energo-sistem* (Reliability of Power System Equipment). M.: Izd-vo zhurnala «Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie», 2013, 196 p.
- Abdurahmanov A.M., Misrihanov M.Sh., Shuntov A.V.** *Elektricheskie stantsii – in Russ. (Electric Power Plants)*, 2007, No. 4, pp. 2–11.
- Abdurahmanov A.M., et al.** *Elektricheskie stantsii – in Russ. (Electric Power Plants)*, 2005, No. 5, pp. 54–57.
- Abdurahmanov A.M.** *Razrabotka modeley nadezhnosti kommutatsionnogo oborudovaniya i rekomendatsiy po ih primeneniyu v zadachah elektroenergetiki: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* (Development of Reliability Models of Switching Equipment and Recommendations for Their Application in the tasks of the Electric Power Industry: Author. Dis. ... Cand. Sci. (Eng.)). M.: MEI (TU), 2008, 20 p.
- Nazarychev A.N., Sulynenkov I.N., Tadzhibaev A.I.** *Otsenka nadezhnosti vyklyuchateley raspredelitel'nykh ustroystv elektricheskikh stantsiy i podstantsiy* (Reliability Assessment of Switchgear Circuit-Brakers of Power Stations and Substations). SPb.: DEAN, 2018, 176 p.
- Sulynenkov I.N.** *Sovershenstvovanie modeli otkazov vyklyuchateley raspredelitel'nykh ustroystv 35–750 kV: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* (Improvement of the Failure Model of Circuit-Brakers of Switchgear 35–750 kV: Author. Dis. ... Cand. Sci. (Eng.)). Ivanovo: IGEU, 2013, 20 p.
- STO 56947007-29.240.30.010-2008.** *Skhemy printsipial'nye elektricheskie raspredelitel'nykh ustroystv podstantsiy napryazheniem 35-750 kV. Tipovye resheniya* (Schematic diagrams of electrical distribution devices of substations with a voltage of 35-750 kV. Typical solutions). M.: OAO «FSK EES», 2007, 132 p.
- SO 153-34.20.118-2003.** *Metodicheskie rekomendatsii po proektirovaniyu razvitiya energosistem* (Methodological Recommendations for the Design of the Development of Power Systems). M.: ZAO NTTs PB, 2010, 56 p.
- Nazarychev A.N., et al.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2021, No. 9, pp. 12–20.

[23.09.2021]