
На правах рукописи



СУЛЫНЕНКОВ Илья Николаевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МОДЕЛИ ОТКАЗОВ
ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ
УСТРОЙСТВ 35–750 КВ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции
и электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново, 2013

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» и в федеральном государственном автономном образовательном учреждении дополнительного профессионального образования «Петербургский энергетический институт повышения квалификации» Минэнерго РФ.

Научный руководитель **Назарычев Александр Николаевич,**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Папков Борис Васильевич,**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУВПО «Нижегородский государственный
технический университет имени Р.Е. Алексеева»,
профессор кафедры «Электроэнергетика и электроснабжение»

Ведерников Александр Сергеевич,
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУВПО «Самарский государственный тех-
нический университет», заведующий кафедрой
«Электрические станции»

Ведущая организация **Открытое акционерное общество высоко-**
вольтного оборудования «Электроаппарат»,
г. Санкт-Петербург

Защита состоится **24 декабря 2013 г. в 11 часов 00 минут** на заседании диссертационного совета Д 212.064.01 при Ивановском государственном энергетическом университете по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корпус Б, ауд. 237.

Отзывы (в двух экземплярах, заверенные печатью организации) просим направлять по адресу: **153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, Ученый совет ИГЭУ.** Тел.: (4932) 38-57-12, (4932) 26-98-61, факс (4932) 38-57-01.
E-mail: uch_sovet@ispu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». Автореферат размещен на сайте ИГЭУ www.ispu.ru.

Автореферат разослан 22 ноября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.064.01
доктор технических наук, профессор



Шувалов Сергей Ильич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время износ электрооборудования сетевых и генерирующих компаний превышает 60 %. В то же время спрос на электрическую энергию и мощность неуклонно растет. По оценкам Министерства энергетики Российской Федерации, уже к 2015–2016 году потребность в электрической мощности может достичь уровня существующей установленной мощности электростанций. Эти обстоятельства потребуют в ближайшей перспективе значительного увеличения темпов строительства новых и реконструкции действующих энергообъектов. В условиях ограничения инвестиционных возможностей энергетики остро встает задача оптимизации затрат по уровню капитальных вложений и надежности на этапе проектирования.

Распределительные устройства (РУ) являются важной частью электрических станций и подстанций. Определяющее влияние на надежность РУ оказывают высоковольтные выключатели, обеспечивающие коммутацию электрических цепей во всех режимах. Основным показателем, характеризующим эксплуатационную надежность выключателей, является средний параметр потока отказов (или частота отказов). Для его определения используют методы статистической обработки ретроспективных данных отказов выключателей. При использовании для конкретного выключателя среднестатистического значения параметра потока отказов (ППО) не учитываются условия его эксплуатации и место установки в схеме РУ. Данные об отказах показывают, что такой подход приводит к ошибочным результатам. Это косвенно подтверждается значительным разбросом значений ППО выключателей, приведенных в работах различных авторов. Расчет надежности РУ с использованием усредненного значения частоты отказов не является достоверным и может привести к выбору неэкономичных схемных решений.

Повышение точности определения показателей надежности выключателей возможно на основе развития моделей отказов с учетом дополнительных влияющих факторов путем отказа от полностью статистического подхода оценки показателей надежности. При этом статистическую оценку необходимо производить только для удельных показателей реализации этих факторов, величина которых для конкретного выключателя должна определяться условиями его эксплуатации.

Известно, что наиболее важными факторами, влияющими на надежность выключателей, являются: количество производимых коммутаций и условия, при которых происходил отказ. В этом случае статистически определяются только удельные показатели повреждаемости. Ещё одним фактором является конфигурация схемы РУ. Она оказывает влияние на число выполняемых операций коммутации. Исследования показали, что наибольшее влияние схема РУ оказывает на шиносоединительные и секционные выключатели в схемах со сборными шинами и на выключатели трансформаторов подстанций и блочных трансформаторов электростанций, отказы которых приводят к наибольшему ущербу.

Актуальность работы подтверждается базовыми положениями энергетической стратегии России на период до 2030 года и концепции обеспечения надежности в электроэнергетике.

Цель работы заключается в развитии теории и совершенствовании моделей и

методик расчета показателей функциональной надежности высоковольтных выключателей с учетом топологии схемы распределительного устройства.

Для достижения цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Выполнить анализ существующих моделей отказов высоковольтных выключателей. Определить модель, наиболее приемлемую для практических расчетов надежности схем РУ.

2. Усовершенствовать модель отказов выключателей с позиции учета дополнительных операций коммутаций, выполняемых выключателем в различных схемах распределительных устройств.

3. Разработать методику расчета частоты отказов выключателей на основе усовершенствованной модели.

4. Исследовать влияние схемы распределительного устройства на надежность высоковольтных выключателей.

5. Разработать инженерную методику расчета частоты отказов выключателей на основе номограмм.

6. Провести расчеты на основе разработанных моделей и методик показателей надежности для рекомендованных нормативными документами схем распределительных устройств.

Объектом исследования являются выключатели 35–750 кВ распределительных устройств электрических станций и подстанций.

Предметом исследований являются модели и методики расчета показателей функциональной надежности высоковольтных выключателей.

Соответствие диссертации паспорту специальности. Работа соответствует паспорту специальности 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы: **в части формулы специальности** – «...проводятся исследования по развитию и совершенствованию теоретической ... базы электроэнергетики с целью обеспечения ... надежного производства электроэнергии, ее транспортировки и снабжения потребителей электроэнергией...»; **в части области исследования** – п. 4: «Разработка методов оценки надежности электрооборудования ... электростанций»; п. 11: «Разработка методов анализа ... функциональной надежности электроэнергетических систем ...»; п. 13: «Разработка методов использования ЭВМ для решения задач в электроэнергетике».

Научная новизна полученных результатов состоит в следующем:

1. Получены универсальные уравнения для определения частоты отказов выключателей типовых схем РУ с учетом отказов смежных выключателей.

2. Усовершенствована математическая модель отказов высоковольтных выключателей, отличающаяся от существующих моделей учетом дополнительных коммутаций, выполняемых выключателями в различных схемах РУ.

3. Разработана методика расчета частоты отказов выключателей, в которой задается топология РУ и параметры коммутируемых присоединений, а логика резервирования и модель расчета заложены в алгоритм самой методики.

4. Предложена новая классификация выключателей, позволившая обобщить решения для отдельных выделенных типов и групп в задачах расчета надежности.

5. Получены новые результаты зависимости частоты отказов выключателей от

эксплуатационных факторов, определяемых схемой РУ.

Практическая значимость работы:

1. Разработан алгоритм и программа для реализации предложенной модели отказов выключателей на ЭВМ в целях их использования в проектной практике.

2. Разработана инженерная методика определения частоты отказов выключателей в зависимости от схемы РУ и места выключателя в схеме на основе номограмм.

3. Даны практические рекомендации по учету в частоте отказов выключателей отказов смежных выключателей для различных схем РУ.

Методы исследования. Для решения поставленных в работе задач использованы методы системного анализа, математического моделирования, теории вероятностей и математической статистики, теории надежности и теории матриц.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель отказов высоковольтных выключателей, учитывающая топологию схемы РУ и место их установки.

2. Матричная и номограммная методики расчета частоты отказов выключателей на основе предложенной модели.

3. Результаты расчетов и исследований влияния топологии схемы распределительного устройства на надежность высоковольтных выключателей.

Достоверность основных теоретических положений подтверждается корректным применением теоретических методов, статистическими данными отказов выключателей, совпадением полученных результатов с опубликованными исследованиями других авторов.

Реализация результатов работы. Результаты работы использованы в проектной практике производственного центра «Севзапэнергопроект» ОАО «Северо-Западный энергетический инжиниринговый центр» для расчетов надежности схем РУ с использованием усовершенствованной модели отказов выключателей и при обосновании реконструкции действующих объектов электроэнергетики. Также результаты работы внедрены в учебный процесс Петербургского энергетического института повышения квалификации для проведения занятий по повышению квалификации и профессиональной переподготовке специалистов сетевых и генерирующих компаний, проектных организаций и системного оператора. Реализация результатов работы подтверждена двумя актами внедрения.

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты диссертационных исследований неоднократно докладывались и обсуждались на семинарах и конференциях различного уровня, в том числе: международном семинаре «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики» (г. Вологда, 2007; г. Санкт-Петербург, 2009; г. Баку, 2012; г. Иркутск, 2013); международной научно-технической конференции «Бенардосовские чтения. Состояние и перспективы развития электротехнологии» (г. Иваново, 2005, 2007, 2009); международном семинаре «Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования» (г. Санкт-Петербург, 2012, 2013); региональной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Энергия» (г. Иваново, 2007, 2011); межвузовском научно-практическом семинаре «Пожарная безопасность и надежность

электроустановок и электрических систем» (г. Иваново, 2013 г).

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 16 печатных работах, в том числе в 3 статьях в ведущих рецензируемых изданиях из списка ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 110 наименований, и трех приложений. Общий объем диссертации 149 страниц. Работа содержит 30 рисунков, 6 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, основные задачи, научная новизна и практическая ценность, приведены основные положения, выносимые на защиту, указаны методы исследования, приведена структура диссертации.

В первой главе дана оценка состояния исследования надежности высоковольтных выключателей. Проведен обзор моделей отказов, выполнен их анализ.

Проблеме оценки надежности выключателей посвящено значительное количество публикаций. Существенный вклад в ее решение внесли участники международного научного семинара им. Ю.Н. Руденко «Методические вопросы исследования надёжности больших систем энергетики». Методы и модели надежности энергетического оборудования представлены в работах отечественных и зарубежных авторов: Н.И. Воропая, П.Г. Грудинского, Ю.Б. Гука, Л.И. Двоскина, В.Г. Китушина, Г.Ф. Ковалева, Э.А. Лосева, Н.А. Манова, Л.А. Мелентьева, М.Ш. Мисриханова, А.В. Мясникова, А.Н. Назарычева, Б.Н. Неклепаева, В.А. Непомнящего, В.Р. Окорокова, Б.В. Папкина, М.Н. Розанова, Ю.Н. Руденко, Ф.И. Синьгугова, Ю.А. Фокина, Ю.Я. Чукреева, А.В. Шунтова, Дж. Эндрени, Р. Билланта, Р. Алана и др.

Существующие модели отказов выключателей можно разделить на четыре основные группы: простые модели; модели с учетом типа коммутируемого присоединения; модели с учетом причин возникновения отказов; полные модели. Применение наиболее точных полных моделей невозможно ввиду отсутствия необходимой статистической информации, а использование упрощенных моделей ведет к неточным оценкам надежности схем РУ. На основе анализа статистических данных отказов выключателей обосновано применение модели с учетом причин возникновения отказов.

Частота отказов выключателей, в соответствии с выбранным типом модели, определяется как конструктивными особенностями, так и показателями повреждаемости и частоты ремонтов коммутируемых присоединений. Надежность конструкции выключателя определяется частотой отказов в статическом состоянии $\omega_{ст}$, относительной частотой отказов при оперативных переключениях $\alpha_{оп}$ и относительной частотой отказов при автоматическом отключении коротких замыканий (КЗ) $\alpha_{авт}$. Повреждаемость и частота ремонтов коммутируемых присоединений учитывается числом операций в год $N_{оп}$, производимых выключателем при оперативных переключениях, и числом операций в год $N_{авт}$, проводимых при лик-

це, если выключатель i резервирует отказы выключателя j , и нулю – в противном случае.

Система уравнений (4) в общем случае индивидуальна и зависит от топологии схемы РУ, числа присоединений и типа выключателей. Практическое ее использование, а также анализ влияния отказов смежных выключателей затруднительны. Решение поставленной проблемы возможно на основе сведения системы уравнений (4) к решению одного уравнения.

Произведены расчеты СЛАУ для типовых схем РУ в общем виде с использованием метода Гаусса. На основе анализа результатов на каждом шаге исключения переменных, выработаны рекомендации, позволившие получить универсальные уравнения для определения частоты отказов выключателей с учетом отказов смежных выключателей. Выявленные закономерности позволили сформировать модель отказов выключателей, отличающуюся от существующих учетом дополнительных коммутаций, производимых выключателями в различных схемах РУ:

$$\omega_{Bk} = \omega_{BkHEЗ} + \sum_{i=m1, m2} \left[\frac{a_{\Sigma}}{1 - (n_i - 2) \cdot a_{\Sigma}} \cdot \left[\left(\sum_{j=1}^{n_i} \omega_{B(j,i)HEЗ} \right) + \frac{a_{\Sigma}}{1 - (n_s - 2) \cdot a_{\Sigma}} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \left(\left(\sum_{p=1}^{n_s} \omega_{B(p,s)HEЗ} \right) - \omega_{B(j,i)HEЗ} \right) - \omega_{BkHEЗ} \right] \right], \quad (5)$$

где ω_{Bk} – полное значение частоты отказов выключателей; k – абсолютный порядковый номер выключателя в схеме РУ; $(j,i),(p,s)$ – относительные номера выключателей (индексы относительно рассматриваемых узлов i и s); $m1, m2$ – номера узлов распределительного устройства, коммутируемых k -м выключателем, n_i – число выключателей, коммутирующих узел i , n_s – число выключателей, коммутирующих узел s .

Частота отказов любого выключателя в соответствии с моделью (5) определяется тремя составляющими: собственной независимой частотой отказов $\omega_{BkHEЗ}$; независимой частотой отказов смежных выключателей $\omega_{B(j,i)HEЗ}$ с a_{Σ} в первой степени и весовым коэффициентом, зависящим от числа смежных выключателей; независимой частотой отказов субсмежных (расположенных за смежными) выключателей $\omega_{B(p,s)HEЗ}$ с a_{Σ} во второй степени и весовым коэффициентом, зависящим от числа смежных и субсмежных выключателей. Суммирование в модели производится по всем выключателям узлов. Так как рассматриваемый выключатель не является смежным к самому себе, а смежные не являются одновременно субсмежными, из итогового значения для слагаемых с a_{Σ} в первой степени вычитается частота отказов рассматриваемого выключателя $\omega_{BkHEЗ}$, а из слагаемых с a_{Σ} во второй степени – значение частоты отказов смежных выключателей $\omega_{B(j,i)HEЗ}$.

Определение значения частоты отказов выключателей ω_{Bk} по разработанной модели (5) может приводить к появлению ошибок в расчетах из-за большой трудоемкости вычислений и необходимости учитывать все взаимосвязи в схеме РУ, что затрудняет возможность её практического применения. Для решения этой проблемы разработана матричная методика, позволяющая задавать только топологию схе-

мы РУ и параметры коммутируемых присоединений. При этом модель расчета заложена в алгоритм самой методики.

Предлагаемая методика расчета частоты отказов высоковольтных выключателей состоит из трех этапов. На первом этапе необходимо сформировать две исходные матрицы:

- прямоугольную матрицу связи узлов и выключателей \mathbf{A} размерностью n -узлов на q -выключателей;
- матрицу-строку независимых значений частот отказов выключателей \mathbf{W} размерностью q -выключателей.

Исходная матрица \mathbf{A} определяет взаимосвязи узлов и выключателей в схеме. Под узлом в матрице \mathbf{A} понимается совокупность оборудования и токоведущих частей, расположенных в схеме между двумя и более выключателями. Элемент матрицы связи A_{ij} , расположенный в i -й строке и j -том столбце, равен единице, если узел i связан с выключателем j , и нулю – в противном случае. Матрица-строка \mathbf{W} определяет значение независимых составляющих частот отказов выключателей. Порядковый номер выключателя в матрице \mathbf{W} должен соответствовать номеру столбца матрицы \mathbf{A} . Значения элементов матрицы \mathbf{W} вычисляются по формуле (1).

На втором этапе необходимо сформировать вспомогательные матрицы \mathbf{K} , \mathbf{D} , \mathbf{S} , \mathbf{WS} с использованием двух исходных матриц \mathbf{A} и \mathbf{W} . Вспомогательная матрица-строка повышающих коэффициентов \mathbf{K} размерностью n -узлов определяет величину роста слагаемых, зависящую от числа выключателей, коммутирующих i -узел в схеме РУ. Каждый i -й элемент матрицы \mathbf{K} вычисляются по выражению

$$K_i = \frac{1}{1 - \left(\sum_{j=1}^q A_{ij} - 2 \right) \cdot a_{\Sigma}} . \quad (6)$$

Квадратная матрица смежности узлов \mathbf{S} размерностью $n \times n$ может быть получена умножением матрицы \mathbf{A} на транспонированную матрицу \mathbf{A} :

$$\mathbf{S} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{A}^T . \quad (7)$$

Смежными следует считать узлы, которые связаны в схеме РУ одним выключателем. Элемент матрицы S_{ij} будет равен единице, если какой-либо выключатель коммутирует одновременно оба различных узла i и j , и нулю – в противном случае. Получить значение больше единицы невозможно, так как в этом случае два узла будут связаны более чем одним выключателем, т.е. имело бы место соединение двух узлов двумя или более параллельно включенными выключателями. Такое решение необоснованно ни с точки зрения надежности, ни с точки зрения экономичности, поэтому на практике не встречается.

Матрица-строка \mathbf{D} отказов выключателей относительно узлов размерностью n равна произведению матрицы \mathbf{W} и транспонированной матрицы \mathbf{A} :

$$\mathbf{D} = \mathbf{W} \cdot \mathbf{A}^T . \quad (8)$$

Каждый i -й элемент матрицы \mathbf{D} равен сумме независимых частот отказов выключателей, которые коммутируют узел i .

Матрица \mathbf{WS} частот отказов выключателей, соединяющих узлы, имеет размер-

ность $n \times n$. Элемент матрицы, стоящий на пересечении i -й строки и j -го столбца, равен частоте отказов выключателя, соединяющего узел i с узлом j . Расчет матрицы выполняется в соответствии с формулой

$$WS = P1 \cdot A^T. \quad (9)$$

На третьем этапе производится вычисление матрицы полных частот отказов выключателей **WP**. Расчет предлагается производить поэлементно, так как при использовании формулы в полностью матричной форме записи необходимо было производить многократные умножения на элементы слабозаполненной матрицы **A**. Каждый k -ый элемент матрицы **WP** равен

$$\begin{aligned} WP_k = & W_k + a_{\Sigma} \cdot \sum_{i=1}^n [A_{ik} \cdot K_i \cdot (D_i - W_k)] + \\ & + a_{\Sigma}^2 \cdot \sum_{i=1}^n \left[A_{ik} \cdot K_i \cdot \sum_{j=1}^n S_{ij} \cdot (D_i - WS_{ij}) \cdot (A_{ik} - A_{jk}) \cdot K_j \right]. \end{aligned} \quad (10)$$

В приведенной формуле слагаемые определяют собственную частоту отказов и частоты отказов смежных и субсмежных выключателей соответственно. Во втором слагаемом производится суммирование по всем узлам матрицы **D**. Для каждого i -го элемента производится вычитание значения независимой частоты отказов рассматриваемого выключателя W_k , так как выключатель не является смежным по отношению к самому себе. Исключение i -х узлов, не коммутируемых выключателем k , производится умножением на нулевые коэффициенты A_{ik} .

В третьем слагаемом для каждого узла i матрицы отказов выключателей относительно узлов **D** вычитается значение независимой составляющей отказов выключателя WS_{ij} , соединяющего узлы i и j , так как смежный выключатель не является одновременно субсмежным по отношению к рассматриваемому. Исключение учета этой составляющей для выключателей, коммутирующих оба узла i и j , производится умножением на коэффициент $(A_{ik} - A_{jk})$, который в этом случае будет равен нулю. Исключение не смежных узлов i и j производится умножением на нулевые коэффициенты матрицы S_{ij} . Исключение i -х узлов, не коммутируемых выключателем k , производится умножением на нулевые коэффициенты A_{ik} .

Разработанная методика определения частоты отказов выключателей может быть реализована на ЭВМ.

Третья глава посвящена исследованию влияния схемы РУ на надежность высоковольтных выключателей.

Степень влияния на надежность выключателей топологии схемы РУ определяется надежностью смежных и субсмежных выключателей и их количеством. Наибольший и непосредственный вклад в повышение частоты отказов выключателей вносят отказы смежных выключателей. Субсмежные выключатели вносят опосредованный (через повышение частоты отказов смежных выключателей) вклад, который, по сравнению со смежными выключателями, на порядок меньше. Влияние каждой составляющей целесообразно рассмотреть отдельно.

В работе доказано, что для любого выключателя любой схемы РУ отношение частоты отказов смежных выключателей к независимой составляющей частоты от-

казов рассматриваемого выключателя $\omega_{\text{ВК НЕЗ}}$ равно

$$\omega_{\text{В СМ}}^* = \alpha_{\text{К1}} \cdot a_{\Sigma} \cdot \frac{n}{1 - (n - 2) \cdot a_{\Sigma}} \cdot \left(\alpha_{\text{К2}} \cdot \frac{\omega_{\text{СРi НЕЗ}}}{\omega_{\text{Вк НЕЗ}}} - \frac{1}{n} \right), \quad (11)$$

и зависит:

- от количества смежных выключателей n ;
- числа узлов, коммутируемых выключателем i ;
- относительной частоты отказов при отказах смежных выключателей a_{Σ} ;
- отношения среднего параметра потока отказов выключателей по i -му узлу $\omega_{\text{СРi НЕЗ}}$ к независимой составляющей параметра потока отказов рассматриваемого выключателя;
- корректировочных коэффициентов $\alpha_{\text{К1}}$ и $\alpha_{\text{К2}}$, зависящих от типа выключателя и типа схемы РУ.

На основе анализа нормативных документов по типовым схемам РУ напряжением 35–750 кВ определены максимальные значения количества смежных выключателей $n_{\text{МАКС}}$ в зависимости от класса напряжения, топологии построения схемы РУ и функциональной роли выключателя в схеме РУ. Всё разнообразие построения схем РУ разделено на пять типов схем:

1. Упрощенные схемы с числом выключателей на присоединение менее одного (схемы 4Н, 5Н, 5АН, 6) с $n_{\text{МАКС}}=1/2$ (в числителе – число смежных с одной стороны, в знаменателе – с двух сторон).

2. Кольцевые схемы с одним выключателем на присоединение (6Н, 7, 8) с $n_{\text{МАКС}}=1/2$.

3. Радиальные схемы со сборными шинами с числом выключателей на присоединение более одного (схемы 9, 12, 13, 13Н) с $n_{\text{МАКС}}=7/14$ – 35 кВ, с $n_{\text{МАКС}}=5/10$ – 110-220 кВ.

4. Кольцевые схемы со сборными шинами с числом выключателей на присоединение более одного (схемы 15, 16, 17) с $n_{\text{МАКС}}=6/12$.

5. Радиально-кольцевые схемы со сборными шинами с числом выключателей на присоединение более одного (схемы 9Н, 9АН, 12Н, 14) с $n_{\text{МАКС}}=6/12$.

Приняты во внимание ограничения по допустимому числу одновременно отключаемых присоединений и выключателей при повреждении трансформаторов, линий и отказах выключателей, изложенные в нормах технологического проектирования. Минимально возможное число выключателей для одного узла равно 2. Таким образом, диапазон изменения числа выключателей, коммутирующих один узел, $n=2 \div 8$.

Число узлов, коммутируемых выключателем, определяется схемой построения РУ, местом и функциональным назначением выключателя в схеме и равно 1 или 2. Предложена новая классификация выключателей для различных схем РУ. Выключатели любой типовой схемы РУ можно разделить на четыре типа:

1. Выключатели, коммутирующие один узел схемы РУ: выключатели присоединений схем первого и третьего типа; линейные выключатели, не входящие в кольцевую часть схем четвертого типа.

2. Выключатели, коммутирующие два узла схемы РУ, с одним смежным вы-

ключателем с каждой из сторон: выключатели автоматических перемычек схем первого типа; выключатели схем второго типа; средние выключатели полупорных цепочек схем четвертого типа.

3. Выключатели, коммутирующие два узла схемы РУ, с одним смежным выключателем с одной стороны и с n смежными выключателями с другой стороны: трансформаторные выключатели схем 9Н, 12Н; линейные выключатели схемы 15; шинные выключатели полупорных цепочек схем четвертого типа.

4. Выключатели, коммутирующие два узла РУ, с числом смежных выключателей по обе стороны более одного: секционные и шиносоединительные выключатели схем третьего типа.

Корректировочный коэффициент в формуле (11) $\alpha_{K1}=1$ для выключателей первого и третьего типа, $\alpha_{K1}=(1-a_{\Sigma})$ – для выключателей второго типа и $\alpha_{K1}=2$ – четвертого типа. Корректировочный коэффициент $\alpha_{K2}=1$ для выключателей первого и второго типа, $\alpha_{K2}=(\omega_{CP1\text{ HEЗ}}+\omega_{CP2\text{ HEЗ}})/2\omega_{CP1\text{ HEЗ}}$ – для выключателей четвертого типа, $\alpha_{K2}=(n\omega_{CP1\text{ HEЗ}}+(1-(n-2)a_{\Sigma})\omega_{CP2\text{ HEЗ}})/n\omega_{CP1\text{ HEЗ}}$ – для выключателей третьего типа. В приведенных вычисляемых коэффициентах $\omega_{CP1\text{ HEЗ}}$, $\omega_{CP2\text{ HEЗ}}$ – средние независимые частоты отказов выключателей по узлу со стороны первого и второго ввода рассматриваемого выключателя соответственно; n – число выключателей, подключенных к узлу с $\omega_{CP1\text{ HEЗ}}$.

Отношение среднего параметра потока отказов выключателей по узлу к независимой составляющей параметра потока отказов рассматриваемого выключателя зависит от большого числа факторов. В значительной степени это отношение определяется типом коммутируемых элементов (линия, трансформатор, сборные шины). Выключатели, в зависимости от коммутируемых присоединений, можно разделить на следующие группы:

- выключатели, коммутирующие в РУ два трансформатора (ТТВ);
- выключатели, коммутирующие в РУ две линии (ЛЛВ);
- выключатели, коммутирующие в РУ две секции/системы шин (ШВ);
- выключатели, коммутирующие в РУ линию и трансформатор (ТЛВ);
- выключатели, коммутирующие в РУ линию и сборные шины (ЛШВ);
- выключатели, коммутирующие в РУ трансформатор и шины (ТШВ).

Наибольшая разница в независимых частотах отказов выключателей для различных топологий построения схем РУ наблюдается в следующих случаях:

- для упрощенных схем – для узлов при сочетании выключателей групп ТТВ и ТЛВ, при максимально возможной длине линии, коммутируемой выключателем ТЛВ, и наиболее надежных трансформаторах;
- для кольцевых схем – если рассматриваемый выключатель группы ТЛВ, два смежных – ТЛВ и ЛЛВ, при максимальных длинах линий, не являющихся общими для этих выключателей и небольшой длине линии, коммутируемой рассматриваемым выключателем;
- для схем со сборными шинами – при максимальном числе выключателей, коммутирующих сборные шины, при сочетании: рассматриваемый выключатель ТШВ, два смежных ШВ и остальные ЛШВ при максимально возможной длине линии для рассматриваемого класса напряжения.

Исходя из статистики отказов, установлены следующие соотношения $\omega_{\text{CP HEZ}}/\omega_{\text{K HEZ}}$ для различных напряжений и схем: 35 кВ – 3,11; 110 кВ – 5,06; 220 кВ – 1,99; 330 кВ – 1,86; 500 кВ – 1,8; 750 кВ – 1,36.

На основе информации об отказах выключателей выделены границы изменения параметра a_{Σ} : 0,001÷0,025 1/операцию. Меньшие значения характерны для элегазовых и вакуумных выключателей, большие – для масляных и воздушных.

На рис. 1 представлены графики функций $\alpha=f(\alpha_{\text{K1}} \cdot a_{\Sigma})$ для различных значений n – числа выключателей, коммутирующих узел. Во всех точках кривых значение частоты отказов от смежных выключателей составляет 5% от независимой составляющей самого выключателя. Выше графиков соответствующих функций находятся зоны с частотами отказов более 5%. Верхняя граница выбрана на уровне максимально возможного соотношения $\omega_{\text{CP HEZ}}/\omega_{\text{K HEZ}}=5$. Зона с $\omega_{\text{CP HEZ}}/\omega_{\text{K HEZ}}<1$ характерна для выключателей, коммутирующих ЛЭП, с $\omega_{\text{CP HEZ}}/\omega_{\text{K HEZ}}>1$ – для шиносоединительных, секционных и трансформаторных выключателей.

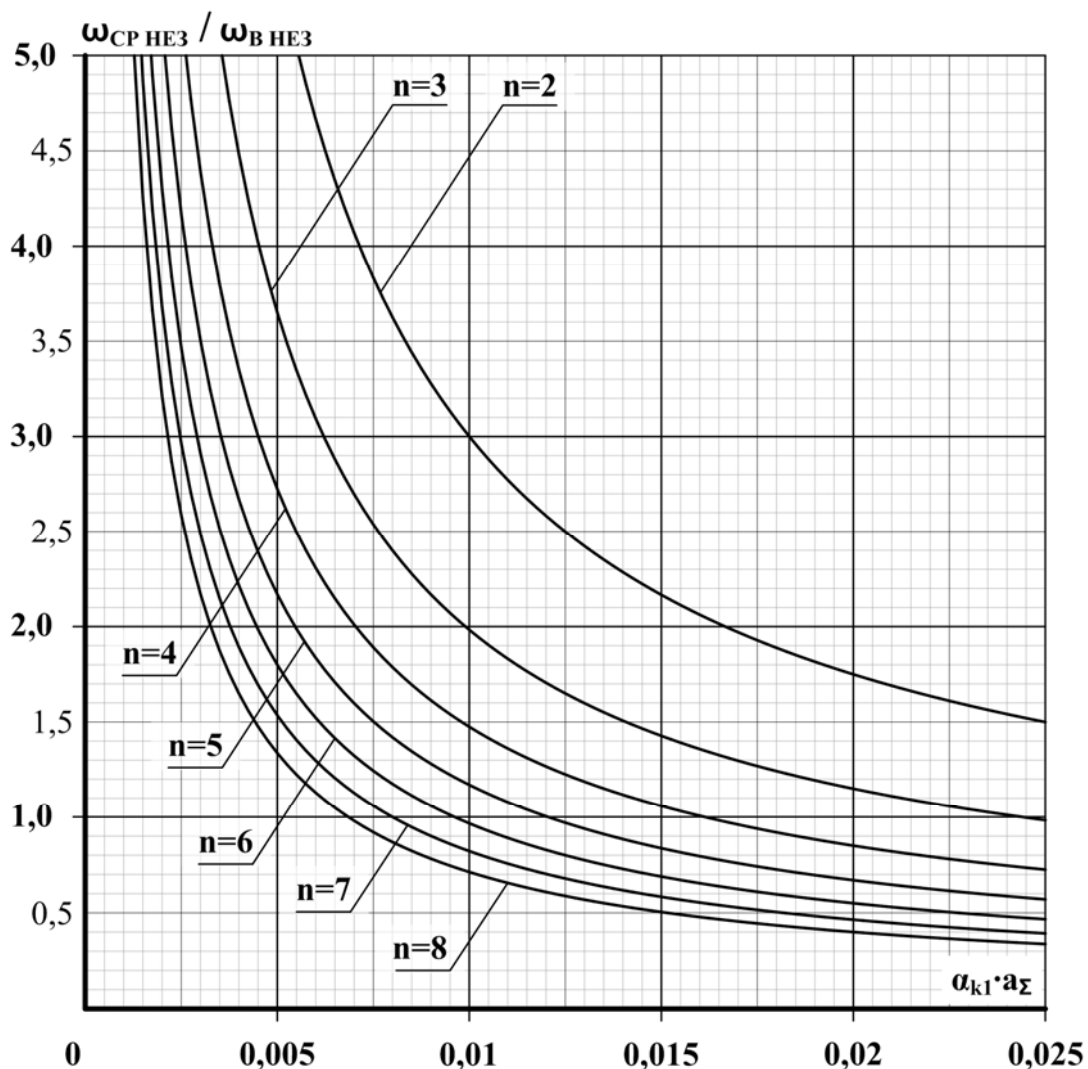


Рис. 1. Графики функций $\alpha=f(\alpha_{\text{K1}} \cdot a_{\Sigma})$ 5%-ной погрешности расчетов для различного числа выключателей n , коммутирующих узел

Исходя из полученных результатов и анализа графиков функций $\alpha=f(\alpha_{\text{K1}} \cdot a_{\Sigma}, n)$, можно сформулировать следующие граничные решения:

- для выключателей с низкими значениями относительных частот отказов при оперативных переключениях и при ликвидации коротких замыканий, в пределах до $a_{оп}+a_{авт}=0,001$, можно не учитывать отказы смежных выключателей;
- для линейных выключателей с числом смежных до трех погрешность расчета из-за не учета отказов смежных выключателей не превысит 5 % при любом значении a_{Σ} ;
- для шинных и секционных выключателей необходимо учитывать отказы смежных выключателей независимо от соотношения $\omega_{срi неЗ}/\omega_{к неЗ}$ при $n=3$ и $a_{\Sigma} \geq 0,012$, $n=4$ и $a_{\Sigma} \geq 0,008$, $n=5$ и $a_{\Sigma} \geq 0,006$, $n=7$ и $a_{\Sigma} \geq 0,004$, $n=8$ и $a_{\Sigma} \geq 0,035$.

Субсмежные выключатели оказывают опосредованное влияние на повышение повреждаемости рассматриваемого выключателя через повышение частоты отказов смежных выключателей. Степень этого влияния на один-два порядка меньше чем от смежных выключателей. Поэтому учитывать ее следует только при одновременном выполнении следующих условий:

- смежные выключатели оказывают существенное (более 5 %) влияние на частоту отказов рассматриваемого выключателя;
- доля субсмежных выключателей в процентном отношении к смежным выключателям превышает величину 5 %.

Для наглядного представления отношения частоты отказов от субсмежных выключателей, к частоте отказов от смежных выключателями, построена номограмма (рис. 2). В первом, втором и третьем квадрантах приведена зависимость для масляных и воздушных выключателей, в шестом, пятом и четвертом – для элегазовых и вакуумных.

Анализ номограммы позволяет сделать следующие выводы:

- для высоконадежных элегазовых и вакуумных выключателей с $a_{\Sigma} \leq 0,01$ 1/операцию можно не учитывать отказы субсмежных выключателей;
- для выключателей с относительной частотой отказов при отказах смежных выключателей, превышающей 0,01 1/операцию, доля отказов субсмежных выключателей может достигать величины 30 % и более от доли смежных выключателей. Решение вопроса о целесообразности учета субсмежных выключателей может приниматься по номограмме;
- наибольшие значения отношения частоты отказов, вносимой субсмежными выключателями, к частоте, вносимой смежными выключателями, наблюдается при следующих условиях: большом числе субсмежных выключателей и количестве смежных выключателей один-два; при более высокой средней повреждаемости субсмежных выключателей по отношению к соответствующей величине для смежных выключателей.

Проведенные в третьей главе исследования позволили расширить представления в области влияния эксплуатационных факторов на надежность высоковольтных выключателей.

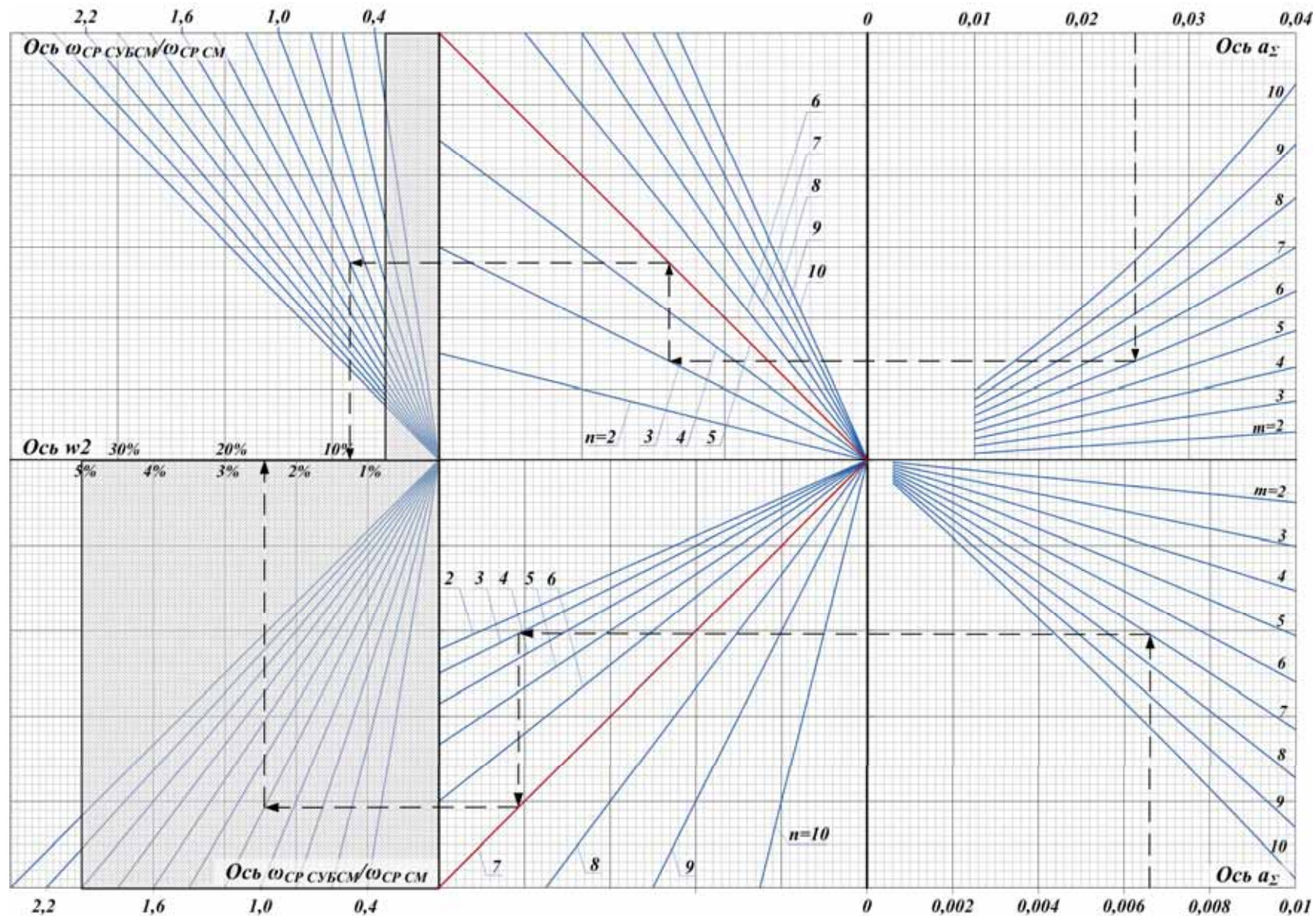


Рис. 2. Отношение частоты отказов от субсмежных выключателей, к частоте отказов от смежных выключателей ω_2 в зависимости от числа смежных n , субсмежных m и отношения их независимых средних частот отказов $\omega_{СР СУБСМ}/\omega_{СР СМ}$

В четвертой главе рассмотрены вопросы практического использования разработанной модели отказов высоковольтных выключателей.

Предложен алгоритм вычисления частоты отказов выключателей, выполненный на базе описанной в главе 2 матричной методики расчета. Блок-схема алгоритма приведена на рис. 3. На базе представленного алгоритма создана программа, выполненная в приложении Microsoft Excel с использованием встроенного языка программирования Visual Basic for Applications.

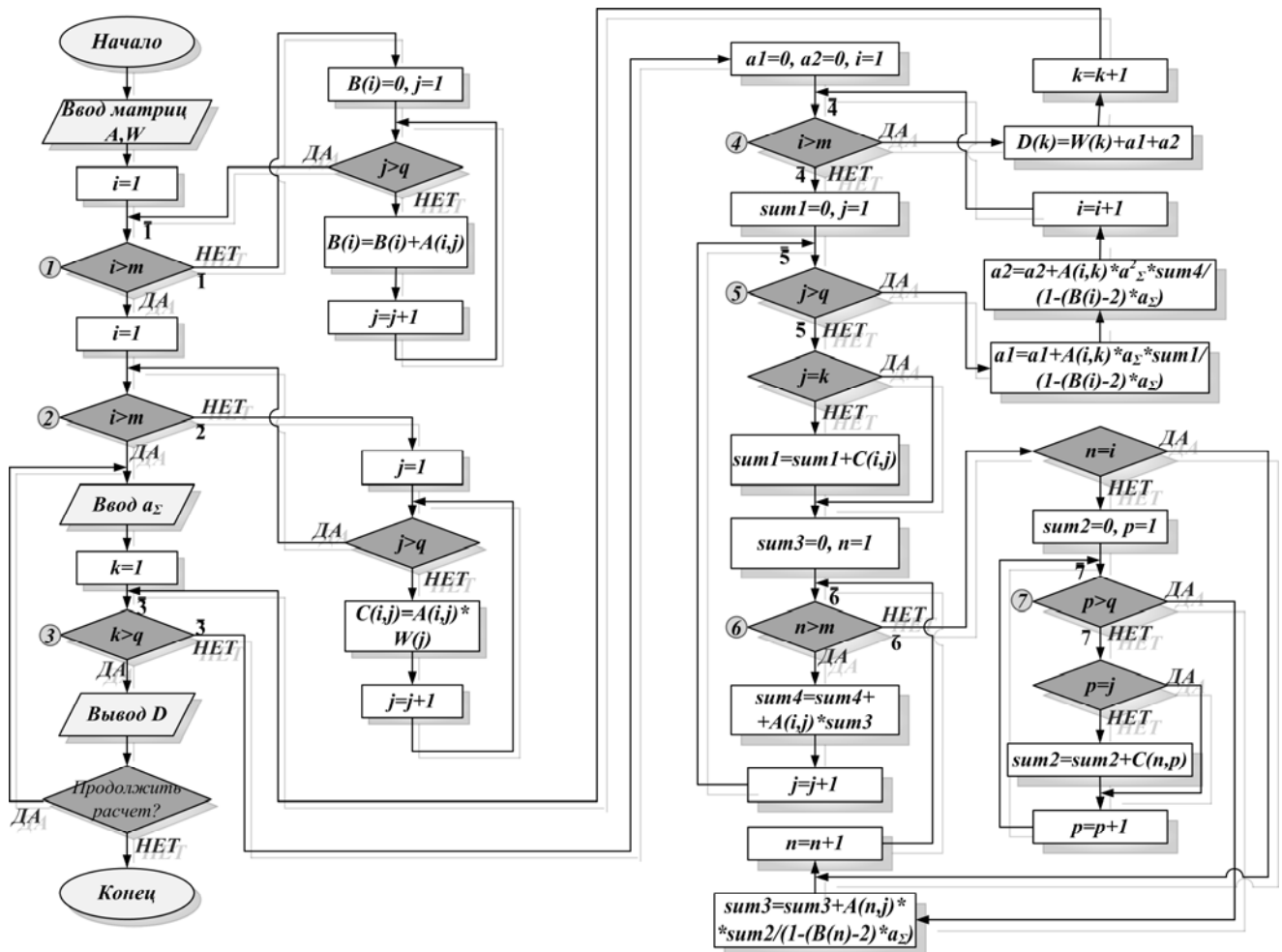


Рис. 3. Блок-схема алгоритма вычисления частоты отказов выключателей по разработанной матричной методике

Разработана инженерная методика расчета параметра потока отказов с использованием номограмм. Выполнены математические операции по упрощению модели отказов (5): выявлены общие закономерности и определены повторяющиеся члены, произведено разделение формулы на дополнительные коэффициенты. В результате вдвое сократилось число квадрантов, используемых при построении номограммы, что существенно упростило ее практическое применение, повысило точность расчетов в результате увеличения масштаба квадрантов. Разработанная номограмма представлена на рис. 4.

В главе выполнены многовариантные расчеты частоты отказов для выключателей различных типовых схем РУ. Результаты показали удовлетворительное совпадение значений частот отказов, вычисленных по исходной системе уравнений (4) и по разработанной модели (5). Погрешность не превышает 0,5 %.

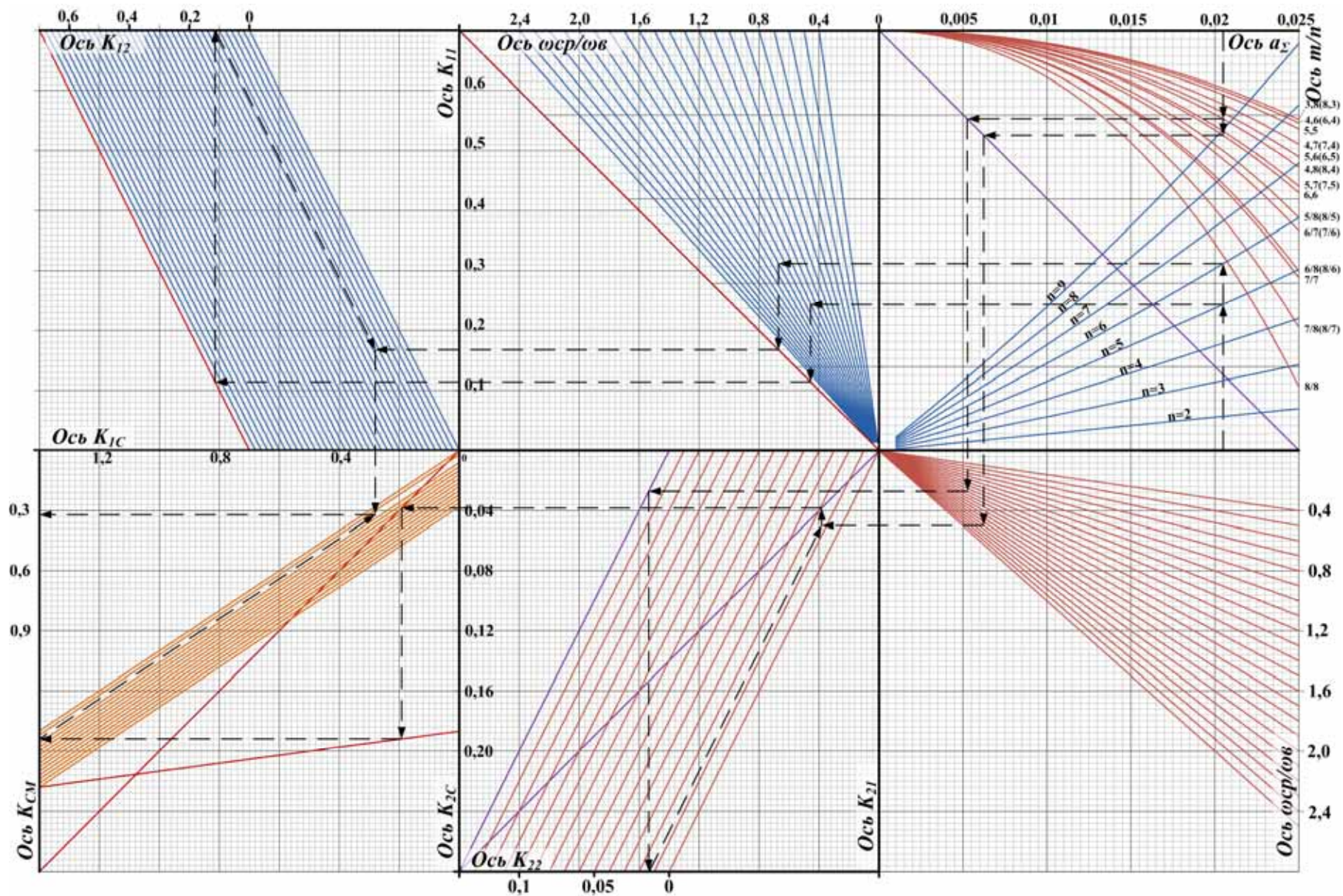


Рис. 4. Номограмма для определения относительного увеличения частоты отказов выключателя

В таблице представлены результаты расчетов частоты отказов выключателей напряжением 220 кВ четырех типовых схем распределительных устройств, а именно: 9 – «Одна рабочая секционированная выключателем система шин»; 9Н – «Одна рабочая секционированная по числу трансформаторов система шин с подключением трансформаторов к секциям шин через развилку выключателей»; 9АН – «Одна рабочая секционированная система шин с подключением ответственных присоединений через полуторную цепочку»; 17 – «Полуторная схема». Число присоединений для всех схем равно восьми: 6 воздушных линий электропередачи (ВЛЭП) и 2 трансформатора. Показатели надежности элементов РУ: сборные шины 220 кВ $\omega=0,013$ 1/(год·прис.), $\mu=0,166$ 1/(год·прис.); трансформатор ТРДН-63000/220 мощностью 63 МВА с $\omega=0,035$ 1/год, $\mu=0,75$ 1/год; ВЛЭП протяженностью 100 км каждая с $\omega_0=0,36$ 1/(100км·год), $\mu=1,8$ 1/год; выключатели воздушные с $a_{оп}=a_{кз}=0,006$ 1/операцию и $\omega_{ст}=0,002$ 1/год.

Результаты расчетов частот отказов выключателей для схем РУ

Параметр	Значения параметров для схемы/выключателя													
	Схема 9			Схема 9АН				Схема 9Н		Схема 17				
	ЛШВ	ТШВ	ШВ	ЛШВ-1	ЛШВ-2	ТШВ	ТЛВ	ЛШВ	ТШВ	ЛШВ-1	ЛШВ-2	ТШВ	ЛЛВ	ТЛВ
$\omega_1 \cdot 10^{-2}$, 1/год	2,64	1,54	1,63	2,64	2,64	2,17	3,18	2,64	1,54	4,37	4,37	2,17	7,11	4,91
$\omega_2 \cdot 10^{-2}$, 1/год	2,75	1,67	1,87	2,74	2,78	2,31	3,25	2,75	1,68	4,60	4,57	2,4	7,22	5,00
Δ , %	3,9	7,2	12,8	3,4	4,8	6,0	1,9	3,8	8,3	4,9	4,4	9,4	1,5	1,7

Примечание: ω_1 и ω_2 – частоты отказов без учета и с учетом схемы РУ соответственно, Δ - разница между частотами отказов ω_1 и ω_2 в процентах.

Исходя из полученных результатов, можно сделать следующие выводы: наибольшее влияние схема РУ оказывает на секционные и трансформаторные выключатели; для однотипных выключателей степень влияния схемы РУ различна.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. В диссертационной работе рассмотрены и систематизированы модели отказов выключателей. Указаны их достоинства и недостатки. Выделены наиболее важные факторы, которые необходимо учитывать в моделях при оценке надежности выключателей.

2. На основе анализа статистических данных об отказах выключателей обосновано применение модели с учетом причин их возникновения. Показано, что данная модель, как и другие типы моделей, не учитывает разницу в частоте отказов выключателей, установленных в различных схемах РУ.

3. Получены универсальные уравнения для определения частоты отказов выключателей типовых схем РУ с учетом отказов смежных выключателей на основе расчетов СЛАУ в общем виде с использованием метода Гаусса.

4. Усовершенствована модель отказов выключателей, отличающаяся от существующих учетом условий эксплуатации выключателей в различных схемах РУ.

5. Разработана методика расчета частоты отказов выключателей, при использовании которой необходимо заложить топологию схемы РУ в виде матрицы связи узлов и выключателей и параметры выключателей и присоединений. При этом модель расчета и разработанный алгоритм поиска смежных и субсмежных выключателей заложены в саму методику.

6. Предложено классифицировать выключатели по типам и группам в зависимости от схемы РУ, места в схеме РУ и вида коммутируемых присоединений, что позволило выработать обобщенные решения для отдельных выделенных групп в задачах учета отказов смежных выключателей.

7. Дан анализ зависимости частоты отказов выключателей от отказов смежных и субсмежных выключателей в схемах РУ. Получены кривые пятипроцентной погрешности при различном числе смежных выключателей, позволяющие принять решение в практических задачах оценки надежности выключателей о целесообразности учета отказов смежных выключателей. Приведены практические рекомендации по учету отказов смежных и субсмежных выключателей.

8. Разработаны алгоритм вычисления частоты отказов выключателей с учетом схемы РУ и программа для его реализации на ЭВМ в приложении Microsoft Excel.

9. Разработана инженерная методика для определения частоты отказов выключателей на основе применения номограмм, позволяющая использовать ее в практических задачах и проектной практике.

10. Произведены многовариантные расчеты для различных схем РУ на основе разработанной модели отказов выключателей, показавшие, что схема РУ оказывает существенное влияние на надежность выключателей.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в изданиях по списку ВАК

1. Сулыненков, И.Н. Исследование влияния топологии схемы распределительного устройства на надежность высоковольтных выключателей / И.Н. Сулыненков, А.Н. Назарычев, А.И. Таджибаев // Надежность и безопасность энергетики.– 2013.– № 3.– С. 14-19.

2. Назарычев, А.Н. Реконструкция открытых распределительных устройств подстанций 110 кВ на основе применения вакуумных выключателей и компактных блочно-модульных конструкций / А.Н. Назарычев, Д.А. Андреев, И.Н. Сулыненков и др. // Вестник ИГЭУ.– 2011.– Вып.2.– С.40-45.

3. Назарычев, А.Н. Выбор объемов и очередности реконструкции энергообъектов / А.Н. Назарычев, И.Н. Сулыненков // Надежность и безопасность энергетики.– 2010.– №1(8).– С.63-66.

Публикации в других изданиях

4. Андреев, Д.А. Применение автоматизированной системы оценки надежности при проектировании и техническом перевооружении систем энергетики / Д.А. Андреев, А.Н. Назарычев, И.Н. Сулыненков, Н.Н. Брезгинов // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: сб. науч. тр. Вып.58. Математические модели и методы исследования надежности либерализованных систем энергетики / отв. ред. Н.И. Воропай, М.Ш. Мисриханов.– М–Н.Новгород: Изд-во Волго-Вятской академии государственной службы, 2008.– С.95-102.

5. Сулыненков, И.Н. Совершенствование модели отказов выключателей / И.Н. Сулыненков, А.Н. Назарычев // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Вып.60. Методы и средства исследования и обеспечения надежности систем энергетики / отв. ред. Н.И. Воропай, А.И. Таджибаев; изд. Ученого совета ПЭИПК.– СПб.: Северная звезда, 2010.– С.296-306.
6. Сулыненков, И.Н. Учет действия УРОВ в модели надежности высоковольтных выключателей / И.Н. Сулыненков, А.Н. Назарычев, А.И. Таджибаев // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Вып.63. Проблемы надежности систем энергетики в рыночных условиях / отв. ред. Н.И. Воропай, Н.А. Юсифбейли.– Баку: АзНИиПИИЭ, 2013.– С.432-442.
7. Сулыненков, И.Н. Оценка надежности элегазовых выключателей с учетом влияния УРОВ / И.Н. Сулыненков, А.Н. Назарычев, А.И. Таджибаев // Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования. Вып. 40 / ПЭИПК.– СПб., 2013.– С.122-138.
8. Сулыненков, И.Н. Анализ надежности и безопасности энергообъектов с различными типами выключателей / И.Н. Сулыненков // Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования. Вып. 41 / ПЭИПК.– СПб., 2013.– С.28-35.
9. Сулыненков, И.Н. Повышение надежности и пожаробезопасности энергообъектов при замене выключателей распределительных устройств / И.Н. Сулыненков // Пожарная безопасность и надежность электроустановок и электрических систем: сб. материалов межвуз., науч. Практ. семинара студентов, курсантов и слушателей (07.02.2013 года).– Иваново: ООНИ ИВИ ГПС МЧС России, 2013.– С.25-31.
10. Малова, Е.Е. Оценка технико-экономической целесообразности замены пары ОД-КЗ на современные элегазовые и вакуумные выключатели / Е.Е. Малова, И.Н. Сулыненков // Электроэнергетика. Региональная научно-техническая конференция студентов и аспирантов ЭНЕРГИЯ-2011, Иваново, 28 апреля 2011 г.: материалы конференции / Министерство образования и науки Российской Федерации, ФГБОУВПО Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина.– Иваново, 2011.– С.163-166.
11. Сулыненков, И.Н. Анализ надежности и определение границ применения схем распределительных устройств напряжением 110 кВ и выше / И.Н. Сулыненков, А.Н. Назарычев // Состояние и перспективы развития электротехнологии (XV Бенардосовские чтения): тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. Т.1.– Иваново, 2009.– С.132-133.
12. Сулыненков, И.Н. Определение предельного состояния высоковольтных выключателей на основе оценки коммутационного ресурса / И.Н. Сулыненков, Н.Н. Брезгинов, А.Н. Назарычев // Состояние и перспективы развития электротехнологии (XII Бенардосовские чтения): тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. Т.1.– Иваново, 2005.– С. 128.
13. Назарычев, А.Н. Сбор, обработка, анализ и применение статистики по отказам электрооборудования электростанций / А.Н. Назарычев, И.Н. Сулыненков, Н.Н. Брезгинов // Состояние и перспективы развития электротехнологии (XIV Бенардосовские чтения): тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. Т.1.– Иваново, 2007.– С. 101.
14. Андреев, Д.А. Разработка автоматизированной системы управления надежностью электроустановок / Д.А. Андреев, А.Н. Назарычев, И.Н. Сулыненков, Н.Н. Брезгинов // Состояние и перспективы развития электротехнологии (XIV Бенардосовские чтения): тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. Т.1.– Иваново, 2007.– С. 150.
15. Сулыненков, И.Н. Разработка автоматизированного программного комплекса по расчету параметров схемной надежности / И.Н. Сулыненков // Состояние и перспективы развития электротехнологии (XIV Бенардосовские чтения): тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. Т.1.– Иваново, 2007.– С. 153.
16. Сулыненков, И.Н. Применение автоматизированной системы оценки структурной надежности / И.Н. Сулыненков // Электроэнергетика. «Энергия 2007»: тез. докл. региональной. науч.-техн. конф. студ. и асп. Т.3.– Иваново, 2007.– С. 82-83.