

АННОТАЦИЯ

диссертации Әмірбек Динары Әмірбекқызы «Повышение надежности схем электрических станций путем дублирования и резервирования», представленной на соискание степени доктора философии (PhD) по специальности 8D07103 – «Электроэнергетика»

Актуальность проблемы

Повышение надежности главных схем электрических станций (), включая релейную защиту, может привести к увеличению поставок электроэнергии (ПЭ), уменьшению ущерба и затрат из-за ненадежности схем, и поэтому актуально. В ту часть теории надежности, которая относится к главным схемам, внесли вклад Гук Ю.Б., Мисриханов М.Ш., Непомнящий В.А., Синьчугов Ф.И., Федосеев А.М., Смирнов В.А, Фигурнов Е.П., Шалин А.И.

Основным методом повышения надежности этих схем уже несколько десятилетий остается замена воздушных (ВВ) и масляных выключателей на более надежные элегазовые (ЭВ) и вакуумные, а в релейной защите их присоединений - переход на микропроцессорную элементную базу. Имеется много статей по определению надежности выключателей. При этом утверждается, что ЭВ надёжнее, чем ВВ, на 10-90%. Однако, как это отражается на поставку электроэнергии (ПЭ), ущербе и на затратах не обнаружено в статьях журналов из Scopus и Web of Science, а также России и Казахстана, несмотря на тщательную проработку, и впервые показано нами [1] только в 2023 г. В этих журналах не оценивалась и возможность дальнейшего увеличения ПЭ за счет разработки более надежных выключателей, чем ЭВ, и по какому пути идти. Может быть, для дальнейшего увеличения ПЭ стоит обратить особое внимание на надежность блоков генератор-трансформатор и линий; или попытаться создать новые главные схемы, более надежные, чем традиционные, не заменяя выключатели? На последний вопрос для главных схем треугольника – шестиугольника на напряжении 330-750 кВ для КЭС и ГЭС даны ответы в докторской диссертации Динмуханбетовой А.Ж. в 2022 году. Но для более распространенных главных схем (3/2 и 4/3 выключателя на присоединение) нет ответов ни на этот, ни на остальные вопросы.

Что касается РЗ присоединений главных схем, то здесь в плане повышения надежности большие надежды возлагались на переход на микропроцессорную базу, которые, как показали последние 20 лет, не оправдались [2]. При этом надежность дистанционных защит и защит нулевой последовательности, находящихся в эксплуатации, не улучшается, но их отказ как резервных, не резервируется.

[1] Barukin, A.S., Kletzel M.Ya., Dinmukhanbetova A.Zh., Amirbek, D.A. Introduction of an Auxiliary Breaker into the Generator-Transformer Block for Energy Saving in Open Switchgear Circuits of Power Plants. // Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations. - Vol. 66. - № 4 (2023). - P. 333–343.

[2] Гуревич В. И. Микропроцессорные устройства релейной защиты: настоящее и будущее: // Электричество. – 2007. - №4, С. 30 - 36.

Более того, увеличилось количество аварий, в том числе и техногенных, например, в 2005 г. в Москве и в Испании, и в 2015 г. в Белоруссии, в 2018 г. в США, в 2019 г. в Великобритании и в 2023 г. в Узбекистане, которая захватила Киргизию и часть Казахстана. Можно ожидать, что в связи с износом оборудования в СНГ (в Казахстане 75% уже отслужило свой срок) их количество будет только возрастать. Сейчас для повышения надежности защит в Казахстане, как и во всем мире, применяется простое дублирование. Оно улучшает надежность срабатывания, но ухудшает несрабатывание. И то и другое улучшает мажорирование (дублирование по принципу два из трех). Однако его внедрению препятствует на сверхвысоком напряжении стоимость трансформаторов тока и недостаточное количество защит разного принципа действия. Поэтому разработка таких защит с мажорированием без трансформаторов тока, как и ответы на все поставленные выше вопросы, будут способствовать повышению надежности главных схем электрических станций.

Объектом исследования являются схемы электрических станций.

Предмет исследования – надежность главных схем 3/2 и 4/3 выключателя на присоединение напряжением 330-750 кВ на КЭС и ГЭС.

Связь темы диссертации с общенаучными (государственными) программами. Работа выполнялась в соответствии с приоритетным направлением развития науки «Энергетика и машиностроение» и научными направлениями подкомитета В5 «Релейная защита и автоматика» международной организации CIGRE и связана с получением результатов по Г/Б НИР №66-кму-2/1 от 24.02.2021 года «Энергосбережение путем разработки новых схем открытых распределительных устройств электрических станций» (ИРН АР09058249) в рамках грантового финансирования молодых ученых по научным и (или) научно-техническим проектам на 2021-2023 годы.

Цель работы – повысить надежность главных схем 3/2, 4/3 на КЭС и ГЭС напряжением 330-750 кВ путем дублирования и резервирования.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи:

- Найти способы повышения надежности схем КЭС и ГЭС;
- Спрогнозировать увеличение поставок электроэнергии от замены выключателей на более надежные на ЭС для схем 3/2 и 4/3 построив зависимости НПЭ от частоты λ_B отказов выключателей;
- Создать схемы ЭС на основе схем 3/2 и 4/3, дублируя выключатели;
- Разработать алгоритм действия общей ресурсосберегающей резервной релейной защиты присоединений схемы 4/3 напряжением 330-750 кВ;
- Создать модель подобной защиты с использованием мажорирования;
- Разработать для подобных защит измерительные органы на герконах, не используя трансформаторы тока.

Обоснованность, достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются: грамотным использованием основ теории надежности, релейной защиты и алгебры логики; апробацией, в которую вошли: Патенты РФ № 2739971, № 2744255, № 2768976, № 2769277, Патент РК № 35987; научный журнал «Вестник Торайгыров университет»;

Опубликованные в Scopus материалы Международной конференции по промышленному инжинирингу, приложениям и производству (ICIEAM) (Российская Федерация, г. Сочи, 2021 г.), Международной научно – технической конференции «Электротехнические комплексы и системы» (Российская Федерация, г. Магнитогорск, 2021 г.); Статья опубликованная в Международном научно–техническом журнале «Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ.» (Республика Беларусь, г. Минск, 2023 г.) в Scopus с квартилем Q3 (процентиль 36).

Научная новизна работы:

1. Расчетами доказано, что можно повысить надежность главных схем 3/2 и 4/3, и показано что с их помощью можно прогнозировать на ЭС увеличение поставок электроэнергии (ПЭ) в результате таких замены выключателей на гипотетические, более надежные. Впервые найдены зависимости недопоставки электроэнергии (НПЭ) от частоты отказов заменяемых.

2. Созданы новые схемы КЭС и ГЭС, отличающиеся от схем 3/2 и 4/3 увеличенным количеством выключателей.

3. Предложено для повышения надежности главных схем ЭС строить общую резервную защиту присоединений с помощью герконов с обмотками, которые устанавливаются на безопасном расстоянии от фаз присоединений и используются для одновременного выполнения функций трансформаторов тока (ТТ) и реле тока, и питания токовой обмотки реле направления мощности. Создан алгоритм функционирования общей микропроцессорной защиты с герконами для схемы 4/3 на принципе сравнения токов на присоединениях.

4. Построены модели: резервной защиты, общей для всех присоединений схемы шестиугольника, отличающейся от известных наличием мажорирования измерительного органа с герконами вместо ТТ; и конструкцией для их крепления вблизи фаз присоединений 330-750 кВ.

Новые научные результаты работы:

1. Созданы главные схемы ЭС, основанные на схемах 3/2 и 4/3, методика расчета увеличения поставок электроэнергии при замене выключателей на более надежные. Получены зависимости НПЭ для КЭС и ГЭС от частоты отказов выключателей и блоков, и определено какое увеличение ПЭ дают предлагаемые схемы по сравнению с традиционными и заменой выключателей последних на более надежные.

2. Построен алгоритм действия общей защиты схемы 4/3 с герконами вместо ТТ и реле тока; а также модель такого устройства с мажорированием для схемы шестиугольника и конструкцией для крепления герконов вблизи фаз напряжением 330-750 кВ.

Практическая значимость научных результатов:

1. Разработанные схемы ЭС, основанные на схемах 3/2 и 4/3 с ЭВ, позволят при внедрении на ряде КЭС увеличить поставки электроэнергии в той же степени, что дает замена ВВ на ЭВ, а на ГЭС – только на некоторых;

2. По полученным зависимостям НПЭ от частоты отказов выключателей можно прогнозировать ПЭ при замене их на более надежные;

3. Намечен путь повышения надежности релейной защиты присоединений схем ЭС напряжением 330-750 кВ. Теперь, используя предложенную методику, можно создавать общую резервную защиту всех присоединений для схем ЭС без трансформаторов тока, используя мажорирование и герконы.

Практическая ценность работы:

1. Зависимости НПЭ от частоты отказов выключателя $\lambda_{\text{В}}$ и блока $\lambda_{\text{бл}}$, полученные на основании проведенных расчетов, позволяют определять в России и Казахстане для подавляющего большинства известных схем 3/2 и 4/3 электростанций напряжением 330-750 кВ увеличение ПЭ при замене ВВ на ЭВ и ЭВ на более надежный гипотетический выключатель, а также насколько нужно понизить частоту $\lambda_{\text{бл}}$, чтобы получить такое же увеличение. Возможно, что замена ВВ на ЭВ увеличит ПЭ на КЭС на 4-9 % и на ГЭС на 15-44%, а внедрение новых схем на большинстве КЭС - на 2-7% и приблизительно на половине всех ГЭС на 1-7%.

2. Предлагаемые измерительные органы общих защит присоединений главных схем дают возможность не использовать трансформаторов тока (ТТ), экономя высококачественные медь, сталь и изоляционные материалы. Они позволят повышать надежность главных схем, дублируя не только защиты, но и ТТ, что в настоящее время не делается;

3. Построенная по созданной модели общая защита с новым измерительным органом после испытаний и внедрения позволит резервировать работу всех применяемых и разрабатываемых в настоящее время автономных защит, таким образом повышая надежность главных схем.

К защите представляются: 1. Разработанные схемы ЭС, зависимости НПЭ от $\lambda_{\text{В}}$ и $\lambda_{\text{Г}}$, а также результаты сопоставления НПЭ, ущерб и затрат при их использовании и при замене выключателей на более надежные с такими же для традиционных схем 3/2 и 4/3;

2. Алгоритм функционирования общей релейной защиты присоединений главной схемы ЭС 4/3 с новыми измерительными органами на герконах и модель такой защиты для схем шестиугольника.

Апробация работы. Основное содержание диссертации докладывалось на Международной конференции по промышленному инжинирингу, приложениям и производству (ICIEAM) (Российская Федерация, г. Сочи, 2021 г.), Международной научно – технической конференции «Электротехнические комплексы и системы» (Российская Федерация, г. Магнитогорск, 2021 г.), пленарном заседании Международной научно-технической конференции «VII чтения Ш. Шокина» (г. Павлодар, 2023 г.) и на заседании кафедры «Электронергетика» НАО Торайгыров университет.

Публикации. Результаты работы опубликованы в 9 научных трудах, в том числе: 6 публикаций в изданиях, рекомендуемых КОКСОН, среди которых 1 патент Казахстана, 4 патента Российской Федерации, статья в научном

журнале «Вестник Торайгыров университет»; 2 публикации в материалах международных конференций (в Scopus), Статья в журнале «Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ» в Scopus с квартилем Q3. В 7-ми работах доля моего вклада составляет – не менее 70%, и в двух – 25-30%.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех разделов, заключения и двух приложений. Работа изложена на 74 страницах компьютерного текста, включает 16 рисунков, 7 таблиц. Список использованных источников состоит из 73 наименований.

В первой главе «Надежность схем сверхвысоких напряжений на электрических станциях (ЭС) и их релейной защиты» рассмотрены традиционные главные схемы ЭС типа 3/2 – две системы шин с тремя выключателями на два присоединения (полуторная), и 4/3 - две системы шин с четырьмя выключателями на три присоединения и их надежность, а также основные методы расчета надежности схем ЭС таких, как вероятностный, логико – вероятностный (дерева отказов); логико-аналитический, топологический и таблично-логический метод Гука Ю.Б.. Проанализированы их особенности и недостатки. Подробно описывается, выбранный нами, для сравнительной оценки надежности схем ЭС хорошо апробированный таблично-логический метод.

Для оценки надежности релейной защиты присоединений схем сверхвысоких напряжений ЭС рассматривались виды традиционных основных и резервных защит, и их особенности.

В результате рассмотрения сделаны следующие выводы:

1. Традиционные главные схемы 3/2 и 4/3 выключателя на присоединение имеют недостатки, оказывающие значительное влияние на их надежность. Пути повышения надежности главной схемы электрических станций (ЭС) в настоящее время сводят к замене выключателей на более надежные элегазовые. Что это дает в плане уменьшения недопоставки энергии W , ущерба $У$ и затрат $З$ в схемах 3/2 и 4/3 количественно не оценивалось. Нет работ по прогнозированию W , $У$, $З$ при замене элегазовых выключателей на более надежные и по оценке возможностей использования для повышения их надежности таких общеизвестных методов, как дублирование и резервирование.

2. Самым апробированным методом расчета надежности главной схемы ЭС оказался таблично-логический метод. К тому же, в нем отсутствуют недостатки остальных методов. По этим причинам он и используется в данной работе. При этом у него, как и в программе расчета устранены (при определяющим участии Барукина А.С.).

3. Надежность релейной защиты (РЗ) присоединений главных схем ЭС может оказывать большое влияние на надежность самой схемы приводя при отказах в РЗ к крупным авариям, особенно из-за наличия большого количества, отработавшего свой срок оборудования на ЭС (в Казахстане 75%).

4. В РЗ главных схем уже применяется дублирование и резервирование, но из-за упомянутых аварий – явно в недостаточной степени.

Так при дублировании трансформаторы тока не дублируются, а при резервировании не учитываются отказы резервных защит.

5. Из изложенного следует: ответы и решения на поставленные вопросы и задачи, которым посвящена данная диссертация, будут способствовать повышению надежности схем 3/2 и 4/3.

Во второй главе «Повышение надежности главных схем 3/2 и 4/3 на ЭС путем дублирования, резервирования и замены выключателей» прогнозируется недопоставки электроэнергии электростанцией из-за ненадежности схем, определено доленое участие элементов схем на недопоставку электроэнергии (НПЭ) и оценивается влияние ввода дополнительных выключателей. Рассмотрены новые схемы для повышения надежности схем путем подключения дополнительного выключателя между трансформатором блока и его выключателями, подключением дополнительного выключателя последовательно к каждому из имеющихся в традиционной и с подключением выключателя в горячий резерв, параллельно двум последовательным по предыдущему способу. Описаны режимы их работы, и представлены результаты расчетов уменьшения недопоставки электроэнергии, ущерба от этого недопоставок и затрат на сооружение электростанций. Оценивается влияние генераторного выключателя на поставки электроэнергии (ПЭ) в главных схемах ЭС. Построены зависимости НПЭ от частоты отказов выключателей $\lambda_{\text{В}}$ и блоков $\lambda_{\text{БЛ}}$. Анализируя полученные результаты сделаны следующие выводы:

Рассмотрено 35 главных схем электрических станций (ЭС) напряжением 330-750 кВ, $\lambda_{\text{ВВ}}$, $\lambda_{\text{ЭВ}}$, $\lambda_{\text{ГВ}}$ и $\lambda_{\text{БЛ}}$ – частоты отказов воздушного, элегазового, гипотетического выключателей (ВВ, ЭВ, ГВ) и блока, и все значения цифр зависят от мощности блоков, вида и напряжения схем.

1. Наибольшее влияние на ущерб от недопоставки электроэнергии (НПЭ) из-за ненадежности в схемах с ЭВ оказывает $\lambda_{\text{БЛ}}$: на КЭС (ГЭС) 83-93% (37-86%); $\lambda_{\text{В}}$ выключателей в 4-14 раз (2-10 раз) меньше; а $\lambda_{\text{ВЛ}}$ линий в 7-7600 раз (4-318 раз). Ввод генераторного выключателя в блоки позволяет увеличить поставки электроэнергии в 7÷9 (4÷9) раз, и уменьшить затраты на сооружение ЭС в 1,2÷6,5 раза.

2. Построенные зависимости НПЭ от $\lambda_{\text{ЭВ}}$ и $\lambda_{\text{БЛ}}$ дают возможность прогнозировать его уменьшение при замене выключателей на более надежные и понижение $\lambda_{\text{БЛ}}$, дающее такое же уменьшение. Выведенная на основе этих зависимостей формула позволяет легко рассчитывать ΔW в зависимости от уменьшения частоты отказов выключателей.

3. Замена ВВ на ЭВ с $\lambda_{\text{ЭВ}} = (0,65 \div 0,7) \lambda_{\text{ВВ}}$ уменьшит НПЭ на ГЭС на 13-44%, на КЭС на 4-9%. Ущерб при реконструкции и затраты на сооружение на ГЭС-на 4,4-31% и 0,4-2%, а на КЭС на 1-7%. То же самое можно получить, уменьшив $\lambda_{\text{БЛ}}$ на ГЭС на 22-93%, на КЭС на 4-10%.

4. Замена ЭВ с $\lambda_{\text{ЭВ}} = (0,65 \div 0,7) \lambda_{\text{ВВ}}$ на гипотетический более надежный выключатель с $\lambda_{\text{ГВ}} = 0,7 \lambda_{\text{ЭВ}}$ ($\lambda_{\text{ГВ}} = 0,1 \lambda_{\text{ЭВ}}$) может повысить ПЭ на КЭС на 2-4% (5-11%), а на ГЭС на 1-10% (13-27%). Это можно получить понижая $\lambda_{\text{БЛ}}$. Так,

если $\lambda_{ГВ} = 0,7\lambda_{ЭВ}$, то $\lambda_{БЛ}$ должна быть на 2-20% ниже первоначальной. Если создать выключатель в 100 раз надежнее, чем ЭВ, то на КЭС увеличение ПЭ не превысит 12%, а на ГЭС 30%.

5. Предлагаемый ввод ЭВ между трансформатором блока и его двумя выключателями со стороны высшего напряжения в традиционные главные схемы ЭС с ЭВ может увеличить поставку электроэнергии на КЭС на 1÷7%, а на ГЭС уменьшить. Чтобы получить такой же эффект от замены ЭВ на ГВ надо разработать выключатель с $\lambda_{ГВ}=(0,9\div 0,4)\lambda_{ЭВ}$.

6. Новые схемы с ЭВ, включенными последовательно каждому из имеющихся ЭВ в схемах 3/2 и 4/3 и ещё одного параллельно в горячий резерв, увеличат поставку электроэнергии не меньше, чем от замены ВВ на ЭВ.

7. Результаты данной работы и методики их получения могут быть полезны не только при прогнозировании уменьшения НПЭ на главных схемах рассмотренных и подобных электростанций с любыми исходными данными, но и при определении стратегии совершенствования выключателей.

В третьей главе «Построение ресурсосберегающих общих защит присоединений схем ЭС для повышения их надежности» рассмотрены принцип построения и алгоритм функционирования ресурсосберегающих резервных защит, общих для всех присоединений. Их главное отличие - в использовании герконов с обмоткой вместо трансформаторов тока (ТТ) и токового реле одновременно. Представлен синтез алгоритмов функционирования общей защиты схемы 4/3. Они позволяют строить такую защиту на микропроцессорах или логических элементах любой природы, и реле тока, и реле направления мощности на электромеханических элементах. Это даст возможность, используя обе реализации, максимально повысить (в соответствии с теорией надежности) надежность всей системы релейной защиты главной схемы электростанций, если резервировать установленные там автономные защиты общими по принципу мажорирования, не используя трансформаторы тока. Результаты исследований привели к следующим выводам:

1 Предложенное в данной работе использование герконов с обмотками при построении общих защит присоединений главных схем ЭС позволяет повысить надежность их РЗ не только за счет резервирования автономных защит присоединений, но и за счет резервирования их ТТ и упрощения выполнения общей защиты. К тому же экономится медь, сталь и высоковольтная изоляция. За счет исключения ТТ в общей защите экономия при выполнении её без мажорирования для схемы 4/3 с шестью присоединениями составляет приблизительно 500 тыс. долларов, а с мажорированием 1 млн долларов.

2 Разработанные совместно с Шахаевым алгоритмы действия общей защиты присоединений схемы 4/3 (без мажорирования) с герконами вместо ТТ дают возможность выполнять защита с помощью реле направления мощности двустороннего действия и блока логики на любых логических элементах или на микропроцессорах, когда последний контролирует направление мощности на всех присоединениях.

3 Модель, которой разработана в данной работе общая резервная защита с герконами и микропроцессором для шестиугольника благодаря мажорированию после реализации, испытаний и положительного опыта эксплуатации может быть рекомендована к широкому внедрению на электростанциях для повышения надежности всей системы РЗ.

4 Предложенная модель конструкций для крепления герконов на безопасном расстоянии от фаз электроустановки может послужить основой для разработки измерительного органа с герконами для напряжений 330 - 750 кВ.

Результаты работы сводятся к следующему:

1. Построены модели главных схем ЭС напряжением 330-750 кВ, отличающиеся от схем 3/2 и 4/3 увеличенным количеством однотипных выключателей. Показано, что недопоставка электроэнергии (НПЭ), ущерб и затраты, при внедрении новых схем на КЭС уменьшаются в сравнении с традиционными схемами не менее, чем при замене ВВ на ЭВ (на 1-9%). На ГЭС при замене ВВ на ЭВ цифры достигают 44%, а ввод новых выключателей нецелесообразен.

2. Полученные зависимости НПЭ от частоты отказов выключателей и блока, оказавшиеся прямыми линиями, дают возможность на КЭС и ГЭС прогнозировать уменьшения НПЭ - ΔW , ущерба и затрат при замене ВВ на ЭВ и ЭВ на гипотетические, более надежные выключатели, а также определять какой должна быть частота блока $\lambda_{\text{бл}}$, чтобы получить такое же понижение. Выведенная на основе этих зависимостей формула позволяет легко рассчитывать ΔW .

3. Разработанные модели не использующих трансформаторы тока (ТТ) измерительных органов на герконах и конструкция для их крепления дают возможность строить общие защиты, применяя мажорирование. Это повысит надежность всей системы релейной защиты (РЗ) для сверхвысоких напряжений, экономя при этом высококачественные медь, сталь и высоковольтную изоляцию в небывалых для РЗ размерах.

4. Создана модель такой общей защиты с герконами без ТТ для схемы шестиугольника на принципе сравнения тока в поврежденном присоединении с суммой всех токов остальных присоединений, находящихся в работе. Представлен алгоритм действия общей защиты для схем 4/3 на принципе сравнения направления мощности. Методика построения этих защит проста и может быть использована для создания подобных защит для любых главных схем ЭС.