

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



МАХМУДОВ КАРОМАТУЛЛО АЗИЗОВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ
ОДНОФАЗНОГО АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОВТОРНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ
В ЧЕТЫРЁХПРОВОДНЫХ ТРЁХФАЗНЫХ ЛИНИЯХ
СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Специальность 2.4.3. «Электроэнергетика»

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
Красильникова Татьяна Германовна
доктор технических наук, доцент

Новосибирск – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЛИНИЙ СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ.....	12
1.1 Компактные и сверхкомпактные воздушные линии.....	13
1.2 Четырёхфазные воздушные линии.....	14
1.3 Воздушные линии с резервной фазой.....	15
1.4 Двухцепные воздушные линии.....	16
1.5 Шестифазные воздушные линии.....	17
1.6 Четырёхпроводная трёхфазная линия.....	19
Выводы по главе 1.....	28
ГЛАВА 2 ОБОСНОВАНИЕ РАСЧЕТНЫХ СХЕМ И АЛГОРИТМОВ ДЛЯ АНАЛИЗА ВТОРИЧНЫХ ТОКОВ ДУГИ И ВОССТАНАВЛИВАЮЩИХСЯ НАПРЯЖЕНИЙ.....	29
2.1 Общие положения и описание расчётной схемы.....	29
2.2 Математическая модель линии в фазных координатах.....	33
2.3 Математические модели элементов, входящих в состав расчётной схемы.....	43
2.3.1 Матрица установки продольной компенсации.....	43
2.3.2 Матрица шунтирующих реакторов.....	44
2.3.3 Матрица линейного выключателя.....	45
2.3.4 Матрица шунтирующего выключателя.....	46
2.3.5 Матрица повреждений.....	47
2.3.6 Матрица дуги.....	49
2.3.7 Матрица сопротивления отправной системы.....	49
Выводы по главе 2.....	50
ГЛАВА 3 ПРИМЕНЕНИЕ ОДНОФАЗНОГО АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОВТОРНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ ПРИ ЛИКВИДАЦИИ НЕУСТОЙЧИВЫХ АВАРИЙ НА ЧЕТЫРЁХПРОВОДНОЙ ТРЁХФАЗНОЙ ЛИНИИ.....	51

3.1 Осуществление однофазного автоматического повторного включения в схемах с неуправляемыми шунтирующими реакторами	51
3.1.1 П-образная схема замещения четырёхпроводной трёхфазной линии и пути компенсации вторичного тока дуги	51
3.1.2 Осуществление однофазного автоматического повторного включения в варианте с традиционной конструкцией фаз и полуфаз	52
3.1.3 Осуществление однофазного автоматического повторного включения в варианте с расширенной конструкцией фаз и полуфаз.....	60
3.2 Осуществление однофазного автоматического повторного включения в схемах с управляемыми шунтирующими реакторами	66
3.2.1 П-образная схема замещения четырёхпроводной трёхфазной линии и пути компенсации вторичного тока дуги	66
3.2.2 Осуществление однофазного автоматического повторного включения в варианте с традиционной конструкцией фаз и полуфаз	68
3.2.3 Осуществление однофазного автоматического повторного включения в варианте с расширенной конструкцией фаз и полуфаз.....	71
3.3 Осуществление однофазного автоматического повторного включения в четырёхпроводных трёхфазных линиях при использовании автоматического шунтирования фазы	72
3.3.1 Общие положения	72
3.3.2 Алгоритм для расчета восстанавливающихся напряжений и вторичных токов дуги	73
3.3.3 Анализ восстанавливающихся напряжений и вторичных токов дуги	75
Выводы по главе 3.....	79
ГЛАВА 4 АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ УГЛОВ ОТКЛОНЕНИЯ В ПАУЗУ ОДНОФАЗНОГО АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОВТОРНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ	80
4.1 Общие положения	80

4.2 Угловые характеристики отпавного генератора в характерных режимах	81
4.2.1 Угловая характеристика в нормальном режиме	81
4.2.2 Угловая характеристика в режиме однофазного короткого замыкания	84
4.2.3 Угловые характеристика в режиме ликвидации дуги	86
4.2.4 Угловая характеристика в послеаварийном режиме	93
4.3 Совместный анализ динамической устойчивости отпавной станции и режима на линии в паузу однофазного автоматического повторного включения.....	95
4.4 Исследование динамических переходов при ликвидации дуговых замыканий на линии в паузу однофазного автоматического повторного включения.....	97
Выводы по главе 4.....	103
ГЛАВА 5 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АДАПТИВНОГО ОДНОФАЗНОГО АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОВТОРНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ ЧЕТЫРЁХПРОВОДНОЙ ТРЁХФАЗНОЙ ЛИНИИ.....	104
5.1 Общие положения	104
5.2 Обоснование способа усовершенствования адаптивного однофазного автоматического повторного включения.....	105
5.3 Выбор уставок для надёжной идентификации повреждения	113
5.4 Сравнение токов однофазного короткого замыкания, воздействующих на отпавную и приёмную системы в исходной схеме и при неуспешном одностороннем включении аварийной фазы при использовании адаптивного однофазного автоматического повторного включения.....	118
Выводы по главе 5.....	119
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	120
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	121
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	122
ПРИЛОЖЕНИЕ «А» ПАТЕНТЫ НА ИЗОБРЕТЕНИЯ.....	129
ПРИЛОЖЕНИЕ «Б» АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ	131

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Линии сверхвысокого напряжения решают две задачи, а именно обеспечивают выдачу мощности крупных электростанций и служат как межсистемные связи. В настоящее время электрические связи между ОЭС Сибири и ОЭС Урала представлены линиями электропередачи, проходящими по территории Республики Казахстан. В целях повышения энергобезопасности Российской Федерации целесообразно усиление электрических связей между ОЭС Сибири и ОЭС Урала по территории Российской Федерации за счет строительства ВЛ 500 кВ Курган - Таврическая и ВЛ 500 кВ Алтай – Таврическая.

Широкое применение находят одноцепные линии, к недостаткам которых следует отнести ограниченную пропускную способность, а также низкую надёжность, поскольку при устойчивых однофазных повреждениях линия полностью отключается. Исключить эти недостатки можно путём использования двух одноцепных линий, позволяющих иметь двойную пропускную способность, а при выходе из строя одной цепи передавать до 50% исходной максимальной мощности.

В [1] предложена четырёхпроводная трёхфазная линия (ЧТЛ), в которой одна рабочая фаза выполняется в виде полуфаз, одна из которых в аварийных режимах используется как резервная фаза, а в средней части рабочих фаз для симметрирования режима включены установки продольной компенсации (УПК).

Эта линия имеет такую же пропускную способность, как и двухцепная линия, а по условию надёжности она может переходить на трёхфазный режим работы с передачей не менее 50% исходной максимальной мощности, подобно двухцепной линии. Использование ЧТЛ даёт значительный экономический эффект.

Четырёхпроводные трёхфазные линии сверхвысокого напряжения могут быть использованы при создании межсистемных связей высокой пропускной способности и надёжности, а также при создании электропередачи для выдачи

мощности вновь создаваемых электростанций вместо традиционных двухцепных линий.

Для внедрения предложенной ЧТЛ должен быть проведён комплекс исследований, какой в своё время был осуществлён для традиционных трёхфазных линий. В частности, эти исследования должны включать анализ схемно-режимных характеристик в нормальных, аварийных и послеаварийных режимах, разработку систем защиты от внутренних перенапряжений, решение вопросов релейной защиты, обоснование однофазного автоматического повторного включения (ОАПВ) для ликвидации неустойчивых наиболее вероятных однофазных отказов, оценка экологического влияния такой линии и другие вопросы.

Актуальным вопросом является исследование способов ликвидации неустойчивых наиболее вероятных однофазных повреждений на ЧТЛ в паузу ОАПВ.

Степень разработанности темы исследования

Заметный вклад в решение проблемы ОАПВ для ликвидации неустойчивых отказов в обычных трёхфазных линиях внесли отечественные и зарубежные ученые: А.С. Майкопар, М.Л. Левинштейн, Н.Н. Беляков, В.С. Рашкес, Г.А. Евдокунин, S. Godberg, B.R. Shperling, H. Haubrich и другие.

В настоящее время вопрос использования ОАПВ с учетом изменения угла в процессе динамического перехода, влияющего на гашение вторичной дуги, для четырёхпроводных трёхфазных линий является неизученным в силу новизны рассматриваемых линий.

Объект исследования является четырёхпроводная трёхфазная линия 500 кВ.

Предмет исследования является ликвидация неустойчивых отказов в четырёхпроводной трёхфазной линии в паузу ОАПВ.

Целью работы является исследование однофазного автоматического повторного включения (ОАПВ) и разработка способов и алгоритмов для осуществления ОАПВ в четырёхпроводных трёхфазных линиях. Для достижения цели поставлены и решены следующие задачи:

1. Создание математической модели четырёхпроводной трёхфазной линии СВН, а также сопутствующих элементов.
2. Разработка графического метода расчёта вторичных токов дуги в паузу ОАПВ в линиях сверхвысокого напряжения.
3. Исследование применения неуправляемых и управляемых шунтирующих реакторов при осуществлении ОАПВ.
4. Исследование использования ОАПВ с автоматическим шунтированием аварийной фазы или полуфазы.
5. Разработка алгоритма, объединяющего исследование динамической устойчивости и режима в четырёхпроводной трёхфазной линии.
6. Разработка нового способа реализации адаптивного ОАПВ, повышающего надёжность работы линий сверхвысокого напряжения.

Методы исследования. При выполнении исследований применялись: методы теоретических основ электротехники и теории электрических цепей с распределёнными параметрами, методы математического моделирования несимметричных процессов в линиях на основе теории матриц, а также основы общей теории переходных электромеханических процессов в электроэнергетических системах.

Научная новизна диссертации:

1. Созданы математические модели четырёхпроводной трёхфазной линии и других элементов, связанных с линией.
2. Предложен графический метод расчета вторичных токов дуги в линиях СВН в режиме бестоковой паузы ОАПВ.
3. Рекомендованы эффективные способы ОАПВ для успешного гашения дуги подпитки, базирующиеся на использовании управляемых шунтирующих реакторов, а также с применением автоматического шунтирования фазы или полуфазы четырёхпроводной трёхфазной линии.
4. Разработан алгоритм, объединяющий исследование динамической устойчивости и режима в четырёхпроводной трёхфазной линии для определения максимального угла отклонения δ в паузу ОАПВ.

5. Разработан новый способ реализации адаптивного ОАПВ, основанный на кратковременном одностороннем включении аварийной фазы со стороны соответствующей системы.

Практическая ценность работы:

1. Разработана программа для расчета вторичных токов дуги и восстанавливающихся напряжений в паузу ОАПВ в четырехпроводной трехфазной линии.
2. Даны рекомендации для осуществления успешного ОАПВ в четырехпроводных трехфазных линиях.
3. Предложено техническое решение по осуществлению адаптивного ОАПВ в линиях сверхвысокого напряжения.

Положения, выносимые на защиту:

1. Четырехпроводной трехфазной линии соответствует математическая модель, отличающаяся от модели обычной трехфазной линии. Предложена математическая модель с использованием матричного метода, при котором линия и сопутствующие элементы представлены в фазных координатах.
2. В настоящее время отсутствует расчетный метод определения вторичных токов дуги (ВТД). Применение разработанного графического метода для расчета ВТД в линиях сверхвысокого напряжения позволяет определить необходимую бестоковую паузу ОАПВ.
3. В традиционных линиях для снижения вторичных токов дуги в паузу ОАПВ эффективно использование неуправляемых шунтирующих реакторов, а в четырехпроводной трехфазной линии для этой цели эффективно использование управляемых шунтирующих реакторов и автоматическое шунтирование фазы.
4. При использовании ОАПВ, как основной меры повышения динамической устойчивости, длительность паузы ОАПВ является искомым параметром, определяющим как успешное гашение вторичной дуги, так и устойчивый динамический переход. В работе предложена методика совместного анализа динамической устойчивости отправной станции и режима на

четырёхпроводной трёхфазной линии в паузу ОАПВ, что позволяет найти зависимость ВТД от максимального угла δ и соответственно искомую паузу ОАПВ.

5. На окончательном этапе ОАПВ аварийная фаза включается с двух сторон. Предложен новый способ осуществления адаптивного ОАПВ, основанный на кратковременном одностороннем включении аварийной фазы со стороны соответствующей системы.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Диссертационная работа соответствует следующим пунктам Паспорта научной специальности 2.4.3. – «Электроэнергетика»:

- пункту 8 – Разработка и обоснование алгоритмов и принципов действия устройств релейной защиты и противоаварийной автоматики для распознавания повреждений, определения мест и параметров повреждающих (возмущающих) воздействий в электрических сетях;
- пункту 14 – Разработка методов расчета и моделирования установившихся режимов, переходных процессов и устойчивости электроэнергетических систем и сетей, включая технико-экономическое обоснование технических решений, разработка методов управления режимами их работы;
- пункту 17 – Исследования по транспорту электроэнергии переменным и постоянным током, включая проблемы повышения пропускной способности транспортных каналов, разработки и применения FACTS-устройств, накопителей энергии.

Реализация работы. Разработки и рекомендации диссертационной работы, касающиеся четырёхпроводных трёхфазных линий, могут найти применение при выполнении работ, связанных с выдачей мощности вновь создаваемых электростанций по таким линиям вместо традиционных двухцепных линий, а также с созданием межсистемных связей высокой пропускной способности и надежности. Предложенный метод расчета вторичных токов дуги в линиях СВН в режиме бестоковой паузы ОАПВ используется в учебном процессе

Новосибирского государственного технического университета по дисциплине «Передающие электрические сети».

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается корректным использованием математического аппарата теории волновых процессов в линиях высокого напряжения и теории переходных электромеханических процессов в электрических системах, обоснованность которых доказана многолетней практикой их применения, а также основывается на программной реализации в среде Mathcad разработанных алгоритмов для расчета вторичных токов дуги и восстанавливаемых напряжений в паузу ОАПВ в четырёхпроводной трёхфазной линии.

Апробация работы. Результаты, полученные автором диссертации, докладывались и обсуждались на:

- Всероссийской научной конференции молодых учёных «Наука. Технологии. Инновации», Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск 30 ноября-04 декабря, 2020 г.;

- III Всероссийской научно-технической конференции «Борисовские чтения», Сибирский федеральный университет, г. Красноярск 23-24 сентября, 2021 г.;

- XXV Всероссийском аспирантско-магистерском научном семинаре, посвященном Дню энергетика, Казанский государственный энергетический университет, г. Казань 7-8 декабря, 2021 г.;

- Международном научном семинаре имени Ю.Н. Руденко, 94-е заседание «Надежность систем энергетики в условиях энергетического перехода», г. Алушта 19-23 сентября, 2022 г.;

- Международных и республиканских научно-практических конференциях «Энергетика региона: состояние и перспективы развития». г. Душанбе (2019, 2020, 2021 и 2022 гг.);

- Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы энергетики в условиях цифровизации экономики», Бухарский инженерно-технологический институт, г. Бухара 24-26 ноября, 2022 г.;

Публикации

По результатам исследований опубликовано 22 печатная работа, в том числе 4 научных статьи в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень рекомендованных изданий ВАК РФ; 5 статьи, входящих в наукометрическую базу Web of Science и Scopus; остальные 11 статей в сборниках международных и всероссийских конференций и сборнике научных трудов. Получено 2 патента на изобретение Российской Федерации. Внедрение результатов диссертационного исследования подтверждено тремя актами.

Личный вклад автора диссертации

Автором совместно с руководителем выполнены постановка целей и задач исследования. Автором осуществлен обзор существующих и перспективных путей повышения пропускной способности и надёжности в линиях СВН традиционного типа, предложены методы расчета режимов в четырёхпроводных трёхфазных линиях 500 кВ в паузу ОАПВ. Автором разработан алгоритм для совместного анализа динамической устойчивости отправной станции и режима в ЧТЛ в паузу ОАПВ.

В работах, опубликованных в соавторстве, автору принадлежит формализация поставленных задач исследований, выбор методов их решения, проведение исследований, анализ и обобщение результатов.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка используемой литературы из 66 наименований. Работа изложена на 133 страницах машинописного текста, который поясняется 78 рисунками и 13 таблицами.

ГЛАВА 1 ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЛИНИЙ СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Линии сверхвысокого напряжения решают две задачи, а именно обеспечивают выдачу мощности крупных электростанций и служат как межсистемные связи. Кроме того, электропередачи сверхвысокого напряжения повышают надёжность и экономичность работы энергосистемы. Широкое применение находят одноцепные трёхфазные линии напряжением 500 кВ, характерные промежуточные опоры которых изображены на рисунке 1.1.

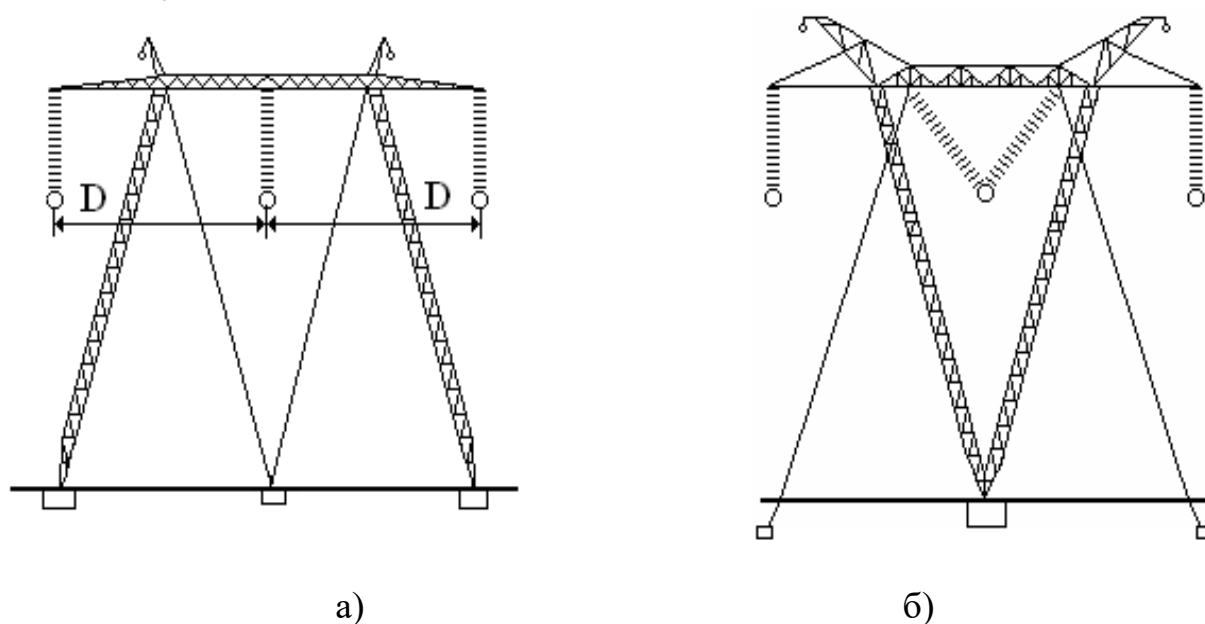


Рисунок 1.1 – Промежуточные опоры ВЛ СВН: порталная (а); V-образная (б)

Высокие темпы экономического роста приводят к увеличению спроса на электроэнергию. Следовательно, при увеличении генерируемой мощности, соответственно, увеличивается передаваемая мощность электропередачи. При переходе на сверхвысокое напряжение можно заметить ряд значительных преимуществ, таких как увеличение пропускной способности, увеличение расстояния передачи, уменьшение потерь при передаче, снижение инвестиций в проект и снижение занимаемой площади.

1.1 Компактные и сверхкомпактные воздушные линии

Инновации, касающиеся трёхфазных одноцепных ВЛ СВН, в основном связаны с усовершенствованием конструкций линий. Значительный научно-технический прогресс в последние десятилетия касался разработки компактных и сверхкомпактных линий [2-9], примеры промежуточных опор которых показаны на рисунке.1.2.

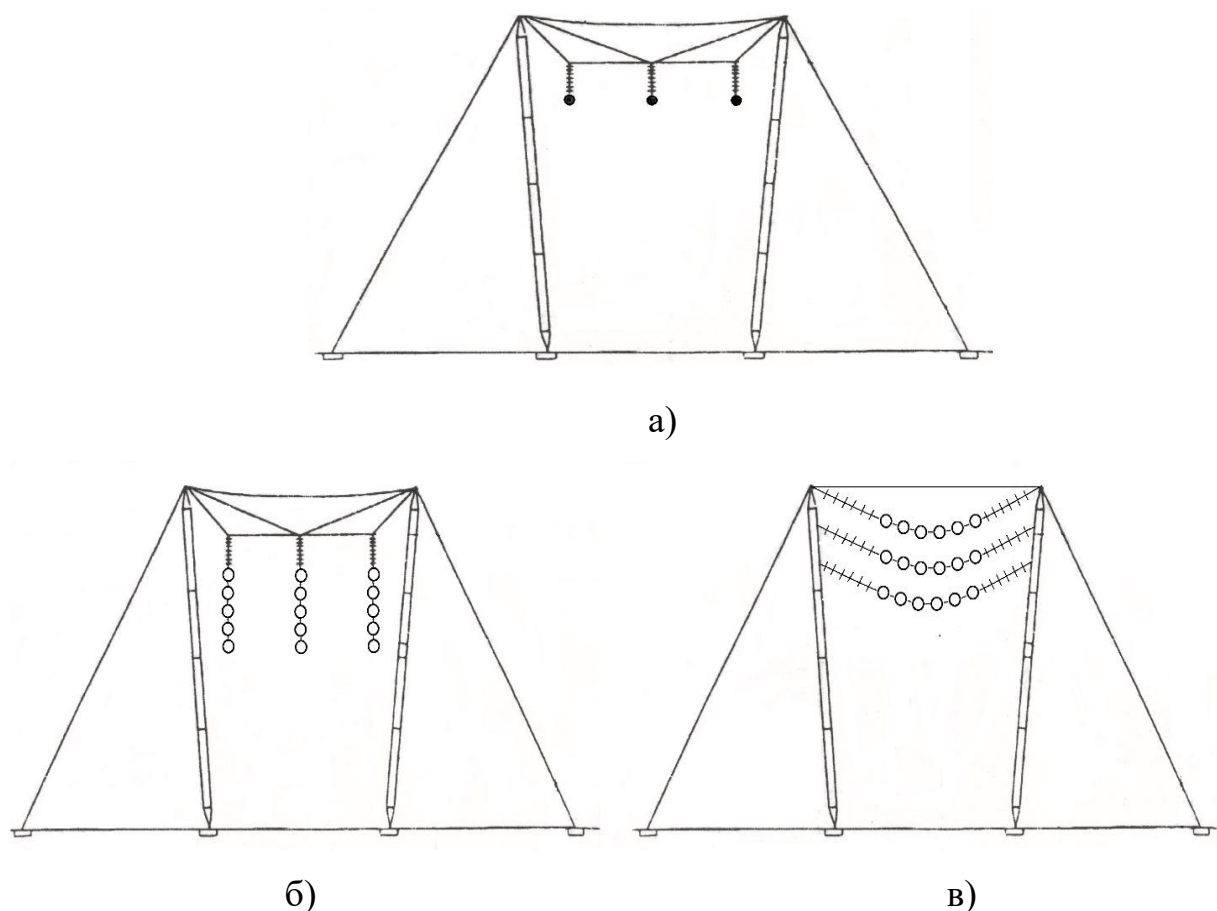


Рисунок 1.2 – Промежуточные опоры: компактная линия (а); сверхкомпактная линия с вертикальным расположением фаз (б); сверхкомпактная линия с горизонтальным расположением фаз (в)

На рисунке 1.2а показана компактная линия с увеличенной натуральной мощности около 50 %, если сравнивать её с традиционной, а удвоенную натуральную мощность можно получить при применении нетрадиционной конструкции фазы (Рисунок 1.2 б, в) [10].

1.2 Четырёхфазные воздушные линии

К одноцепным линиям относится новый тип линий [11], так называемые четырёхфазные линии, в основе которых лежит четырёхфазная уравновешенная симметричная система переменного тока с фазовым сдвигом 90° (Рисунок 1.3). Четырёхфазные линии в свой состав должны включать фазопреобразующие трансформаторы [12,13] для стыковки с трёхфазной системой переменного тока, так как трёхфазная система имеет фазовый сдвиг 120° .

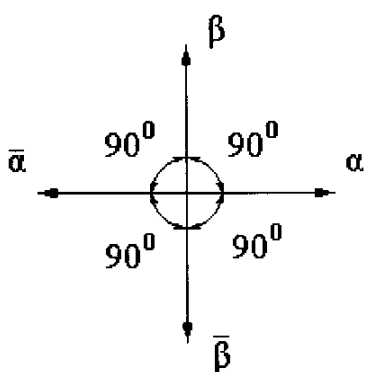


Рисунок 1.3 – Четырёхфазная симметричная уравновешенная система

По таблице 1.1 при сравнении разного типа одноцепных воздушных линий можно заметить увеличение натуральной мощности два и более раза.

Таблица 1.1 – Сравнение одноцепных ВЛ традиционного типа и повышенной натуральной мощности

Тип ВЛ	Конструкция фазы	Волновое сопротивление, Ом	Натуральная мощность, МВт
Традиционная ВЛ 500 кВ	3×АС-500	280	900 (100%)
Компактная ВЛ 500 кВ	6×АС-240	200	1250 (140%)
Сверхкомпактная ВЛ 500 кВ	Сверхкомпактная	140	1800 (200%)
Четырёхфазная ВЛ 500 кВ	5×АС-400	190	1750 (195%)
Традиционная ВЛ 750 кВ	5×АС-400	265	2100 (230%)

Недостатком одноцепных линий является их низкая надёжность, поскольку при устойчивых однофазных повреждениях линия полностью отключается.

1.3 Воздушные линии с резервной фазой

Другого типа воздушных линий, которых называют воздушные линии с резервной фазой тоже можно отнести к одноцепным линиям. Для повышения надёжности, при устойчивых однофазных повреждениях можно применять резервную фазу (Рисунок 1.4), как раз эта и есть отличительная особенность данной линии по сравнению других видов одноцепных линий. На данный момент данной тематике посвящено много работ [14-28], но практической применения всё ещё не нашло. Это связано с недоиспользованием суммарного сечения ВЛ в нормальном режиме, что приведет к снижению экономической эффективности.

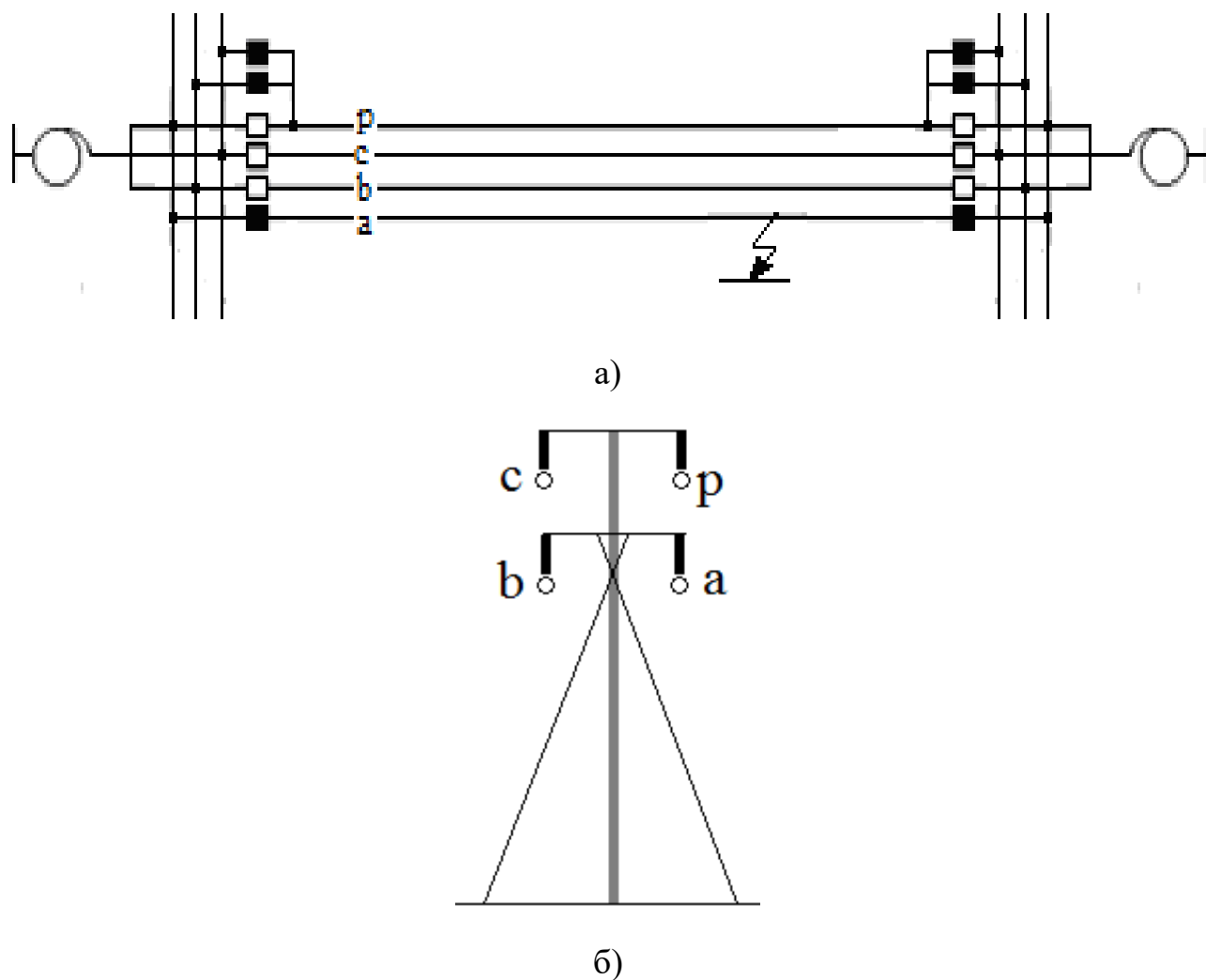


Рисунок 1.4 –ВЛ с резервной фазой: схема электропередачи (а);
опора ВЛ с резервной фазой (б)

1.4 Двухцепные воздушные линии

Частично исключить недостаток, связанный с низкой надёжностью одноцепных линий, возможно путём использования двух одноцепных линий, имеющих двойную натуральную мощность, а при выходе из строя одной цепи возможно передавать до 50% исходной максимальной мощности.

Двухцепные линии могут располагаться на разных опорах, как это показано на рисунке 1.5.

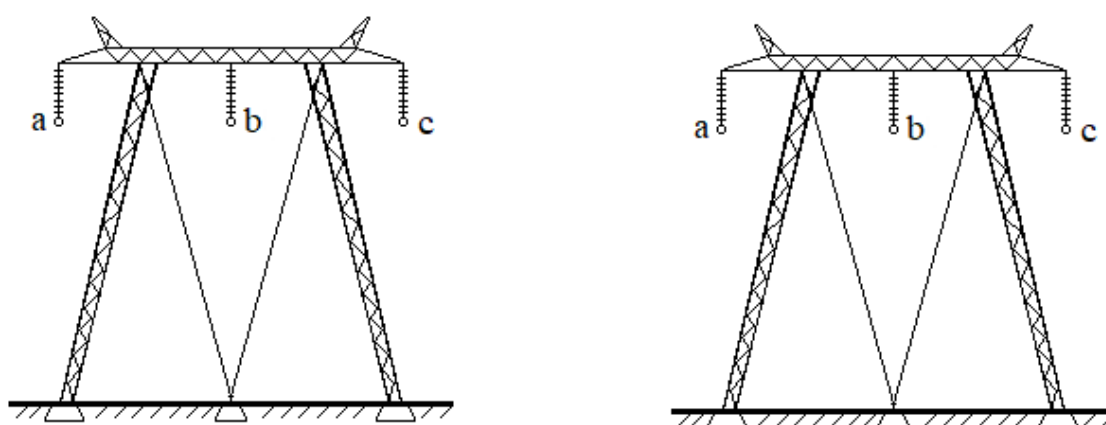


Рисунок 1.5 – Двухцепная линия на разных опорах

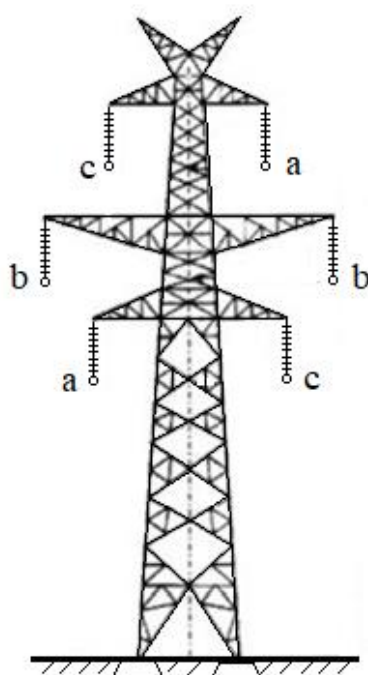


Рисунок 1.6 – Двухцепная ВЛ СВН на одной опоре

Однако в развитых странах, имеющих сравнительно небольшую площадь, таких как Япония, Южная Корея и др., не всегда выделяемые для линий коридоры позволяют сооружать двухцепные линии на разных опорах, и поэтому в этих случаях используются двухцепные линии на одной опоре (Рисунок 1.6).

1.5 Шестифазные воздушные линии

Шестифазные воздушные линии электропередачи впервые были предложены авторами [29-32]. Для создания шестифазной системы авторами было предложено система, в которой угол сдвига между фазами составляет 60° . Такая система приведена на рисунке 1.7 б, замещающая традиционную двухцепную линию (Рисунок 1.7а).

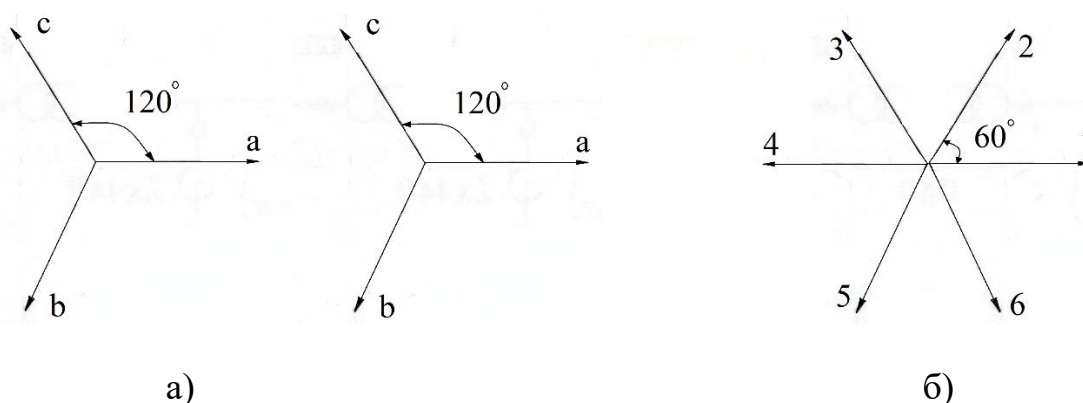


Рисунок 1.7 – Системы переменного тока: две трёхфазные системы (а);
шестифазная система (б)

Необходимо отметить, что шестифазная электропередача до сих пор не нашла практического применения связи с некоторыми слабыми сторонами, в частности, необходимостью усиленных изоляторов, сложностью применения ОАПВ, сложностью проведение ремонтов и т.п.

В таблице 1.2 приведены параметры двухцепных линий на разных опорах и на одной опоре, а также шестифазной линии напряжением $500/\sqrt{3}$ кВ. Указанные

линии характеризуются близкими натуральными мощностями и сопоставимым уровнем надёжности.

Таблица 1.2 – Сравнение двухцепных традиционных и инновационных ВЛ

Тип ВЛ	Конструкция фазы	Волновое сопротивление, Ом	Натуральная мощность, МВт
Двухцепная ВЛ 500 кВ на разных опорах	3×АС-500	140	1800 (100%)
Двухцепная ВЛ 500 кВ на одной опоре	3×АС-500	125	2000 (110%)
Шестифазная ВЛ 500 кВ на одной опоре	3×АС-500	128	1950 (108%)
УСВЛ 500 кВ на одной опоре	3×АС-500	130	1900 (105%)

К шестифазным ВЛ следует отнести оригинальную разработку российских учёных – управляемые самокомпенсирующиеся ВЛ (УСВЛ) переменного тока [33].

Данная линия представляет собой двухцепную линию трёхфазной системы и её фазы располагаются на одной опоре. В ней одноимённые фазы цепей располагаются рядом с минимально допустимым расстоянием. Также для исключения пляски и вибрации проводов между одноимёнными фазами вставляются стяжки. Пример такой линии с промежуточной опорой приведена на рисунке 1.8.

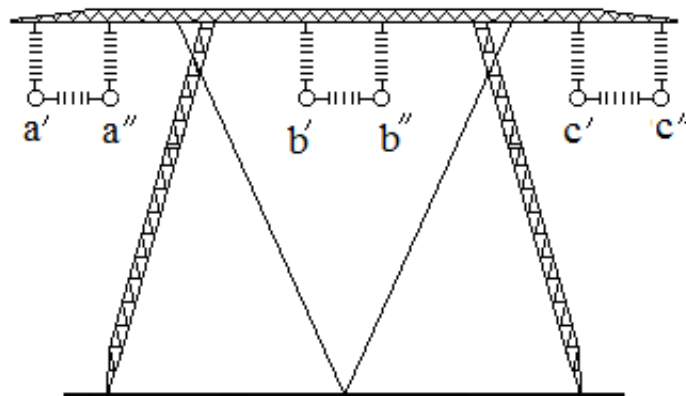


Рисунок 1.8 – Промежуточная опора УСВЛ

1.6 Четырёхпроводная трёхфазная линия

Из всех рассмотренных выше типов линий двухцепные линии сопоставимы с одноцепными линиями постоянного тока, которые при наиболее вероятных однополюсных отказах могут передавать половину мощности исходного максимального режима. Среди одноцепных линий переменного тока повышенной экономичностью и надёжностью обладают лишь четырёхфазные линии. Но очевидным недостатком этих линий является то, что для их работы требуются трансформаторы Скотта сверхвысокого напряжения, которые в настоящее время не изготавливаются в мире.

В [1] предложена одноцепная линия повышенной пропускной способности и надёжности, в которой одна фаза выполняется в виде двух параллельно работающих полуфаз, любая из которых в аварийных режимах используется как резервная фаза, а в средней части фаз для симметрирования режима включены установки продольной компенсации (УПК).

К четырёхпроводной трёхфазной линии (ЧТЛ) в дальнейшем будем применять также название линия с полуфазами.

На рисунке 1.9 показана схема расположения фаз и полуфаз на опоре такой линии.

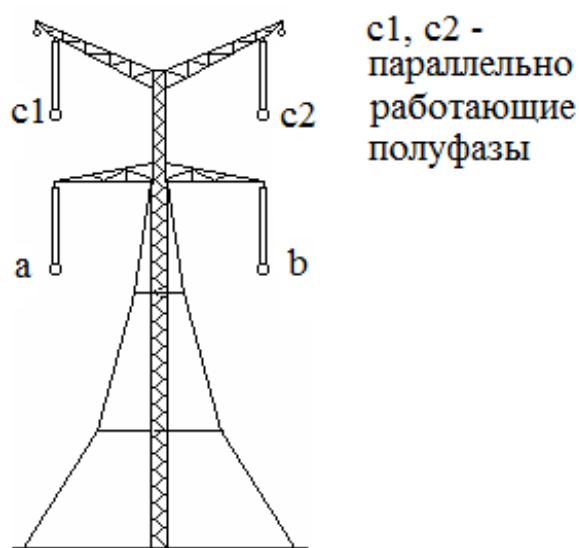


Рисунок 1.9 – Расположение фаз на опоре четырёхпроводной трёхфазной линии

На рисунке 1.10 изображена схема, использующая УПК для симметрирования нормального режима.

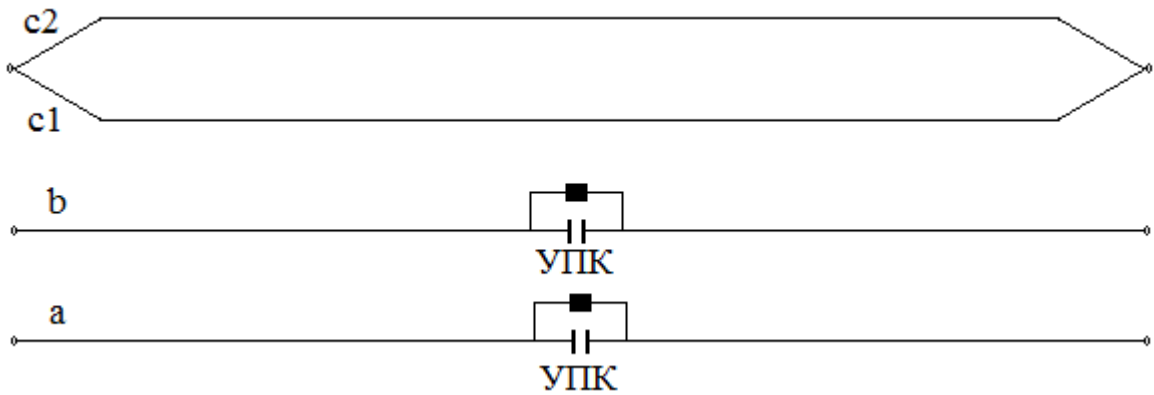


Рисунок 1.10 – Схема четырёхпроводной трёхфазной линии

В конструктивном отношении суммарное сечение полуфаз равняется или близко к сечению отдельной фазы. На рисунке 1.11 изображена одна из возможных конструкций фаз и полуфаз линии 500 кВ.

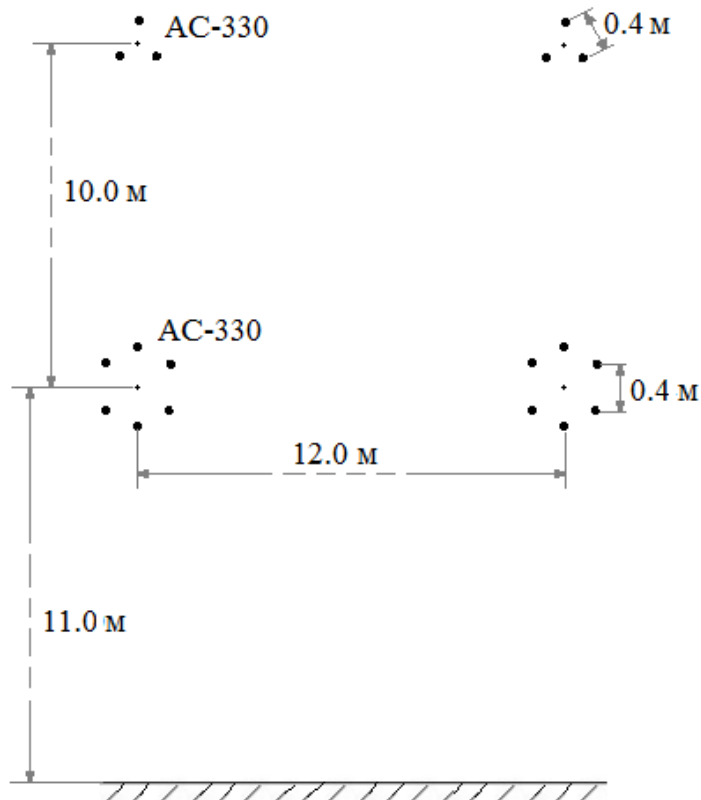


Рисунок 1.11 – Конструкция фаз и полуфаз ЧТЛ

Как будет показано далее, пропускная способность схемы на рисунке 1.10 применительно к линии с полуфазами 500 кВ длиной 500 км составляет 2910 МВт, что превышает в два раза пропускную способность, создаваемую одноцепной традиционной линией и равную 1460 МВт. Для линий напряжением 500 и 750 кВ, пропускная способность которых ограничивается условием по устойчивости, в общем случае соотношение между пропускной способностью линии с полуфазами и одноцепной традиционной линией находится в пределах 1,9 – 2,1 раза.

Что касается надёжности предлагаемой схемы на рисунке 1.10, то, как будет показано далее, при устойчивом повреждении одной из полуфаз (с1, с2) или в случае повреждения одной из фаз (а или б) линия переходит на работу в послеаварийном трёхфазном режиме с возможностью передачи не менее 50% мощности исходного максимального режима.

Поскольку предлагаемая линия обладает пофазной несимметрией, то наиболее универсальным методом расчета является матричный метод, в котором линия и другие элементы представляются в фазных координатах. На рисунке 1.12 приведена схема для расчёта нормального режима.

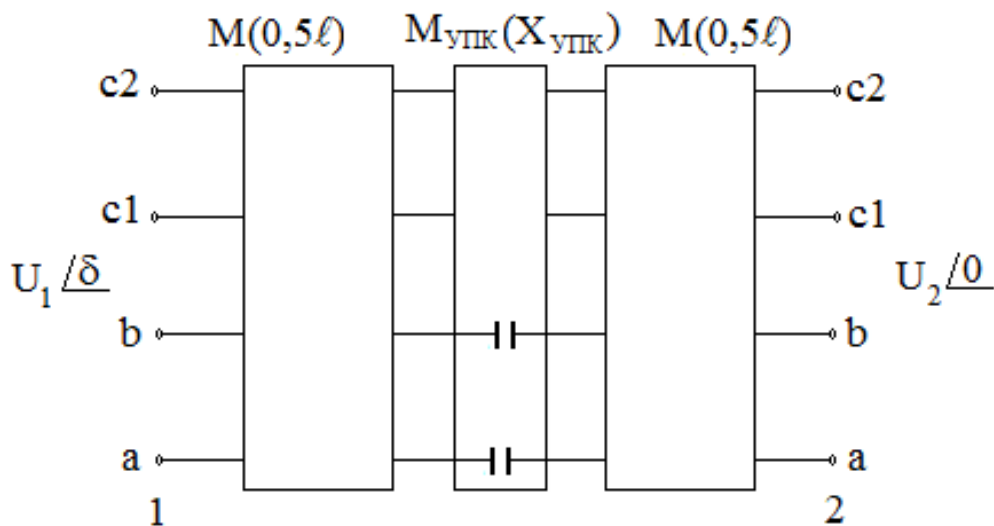


Рисунок 1.12 – Полная схема линии с полуфазами для расчета нормальных режимов

Полная фазная матрица схемы формируется согласно этому рисунку

$$\mathbf{M}_{12} = \mathbf{M}\left(\frac{\ell}{2}\right)\mathbf{M}_{\text{упк}}\mathbf{M}\left(\frac{\ell}{2}\right). \quad (1.2)$$

Соответствующие матрицы в формуле (1.2) определяются следующим образом. Полная матрица нетранспонированного половинного участка линии имеет вид

$$\mathbf{M}\left(\frac{\ell}{2}\right) = \begin{vmatrix} \mathbf{A}\left(\frac{\ell}{2}\right) & \mathbf{B}\left(\frac{\ell}{2}\right) \\ \mathbf{C}\left(\frac{\ell}{2}\right) & \mathbf{D}\left(\frac{\ell}{2}\right) \end{vmatrix} \quad (1.3)$$

где

$$\mathbf{A}\left(\frac{\ell}{2}\right) = \begin{bmatrix} A_{aa}\left(\frac{\ell}{2}\right) & A_{ab}\left(\frac{\ell}{2}\right) & A_{ac1}\left(\frac{\ell}{2}\right) & A_{ac2}\left(\frac{\ell}{2}\right) \\ A_{ba}\left(\frac{\ell}{2}\right) & A_{bb}\left(\frac{\ell}{2}\right) & A_{bc1}\left(\frac{\ell}{2}\right) & A_{bc2}\left(\frac{\ell}{2}\right) \\ A_{c1a}\left(\frac{\ell}{2}\right) & A_{c1b}\left(\frac{\ell}{2}\right) & A_{c1c1}\left(\frac{\ell}{2}\right) & A_{c1c2}\left(\frac{\ell}{2}\right) \\ A_{c2a}\left(\frac{\ell}{2}\right) & A_{c2b}\left(\frac{\ell}{2}\right) & A_{c2c1}\left(\frac{\ell}{2}\right) & A_{c2c2}\left(\frac{\ell}{2}\right) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}\left(\frac{\ell}{2}\right) = \begin{bmatrix} B_{aa}\left(\frac{\ell}{2}\right) & B_{ab}\left(\frac{\ell}{2}\right) & B_{ac1}\left(\frac{\ell}{2}\right) & B_{ac2}\left(\frac{\ell}{2}\right) \\ B_{ba}\left(\frac{\ell}{2}\right) & B_{bb}\left(\frac{\ell}{2}\right) & B_{bc1}\left(\frac{\ell}{2}\right) & B_{bc2}\left(\frac{\ell}{2}\right) \\ B_{c1a}\left(\frac{\ell}{2}\right) & B_{c1b}\left(\frac{\ell}{2}\right) & B_{c1c1}\left(\frac{\ell}{2}\right) & B_{c1c2}\left(\frac{\ell}{2}\right) \\ B_{c2a}\left(\frac{\ell}{2}\right) & B_{c2b}\left(\frac{\ell}{2}\right) & B_{c2c1}\left(\frac{\ell}{2}\right) & B_{c2c2}\left(\frac{\ell}{2}\right) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}\left(\frac{\ell}{2}\right) = \begin{bmatrix} C_{aa}\left(\frac{\ell}{2}\right) & C_{ab}\left(\frac{\ell}{2}\right) & C_{ac1}\left(\frac{\ell}{2}\right) & C_{ac2}\left(\frac{\ell}{2}\right) \\ C_{ba}\left(\frac{\ell}{2}\right) & C_{bb}\left(\frac{\ell}{2}\right) & C_{bc1}\left(\frac{\ell}{2}\right) & C_{bc2}\left(\frac{\ell}{2}\right) \\ C_{c1a}\left(\frac{\ell}{2}\right) & C_{c1b}\left(\frac{\ell}{2}\right) & C_{c1c1}\left(\frac{\ell}{2}\right) & C_{c1c2}\left(\frac{\ell}{2}\right) \\ C_{c2a}\left(\frac{\ell}{2}\right) & C_{c2b}\left(\frac{\ell}{2}\right) & C_{c2c1}\left(\frac{\ell}{2}\right) & C_{c2c2}\left(\frac{\ell}{2}\right) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{D}\left(\frac{\ell}{2}\right) = \begin{bmatrix} D_{aa}\left(\frac{\ell}{2}\right) & D_{ab}\left(\frac{\ell}{2}\right) & D_{ac1}\left(\frac{\ell}{2}\right) & D_{ac2}\left(\frac{\ell}{2}\right) \\ D_{ba}\left(\frac{\ell}{2}\right) & D_{bb}\left(\frac{\ell}{2}\right) & D_{bc1}\left(\frac{\ell}{2}\right) & D_{bc2}\left(\frac{\ell}{2}\right) \\ D_{c1a}\left(\frac{\ell}{2}\right) & D_{c1b}\left(\frac{\ell}{2}\right) & D_{c1c1}\left(\frac{\ell}{2}\right) & D_{c1c2}\left(\frac{\ell}{2}\right) \\ D_{c2a}\left(\frac{\ell}{2}\right) & D_{c2b}\left(\frac{\ell}{2}\right) & D_{c2c1}\left(\frac{\ell}{2}\right) & D_{c2c2}\left(\frac{\ell}{2}\right) \end{bmatrix} - \text{матричные коэффициенты 4-}$$

порядка для линии без учёта тросов, которые в нормальном режиме отключены от линии.

Полная матрица УПК представляется в виде

$$\mathbf{M}_{\text{упк}} = \begin{vmatrix} \mathbf{1}_4 & \mathbf{Z}_{\text{упк}} \\ \mathbf{0}_4 & \mathbf{1}_4 \end{vmatrix} \quad (1.4)$$

где $\mathbf{Z}_{\text{упк}} = \begin{bmatrix} Z_{\text{упк}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_{\text{упк}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$, $Z_{\text{упк}} = i \cdot X_{\text{упк}}$ - фазное сопротивление УПК.

Нулевая и единичная матрицы 4-го порядка соответственно определяются как

$$\mathbf{0}_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{1}_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (1.5)$$

Вектор - столбцы заданных напряжений по концам линии задаются как

$$\mathbf{U}_1 = \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}} e^{i\delta} \begin{vmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \\ a \end{vmatrix}, \quad \mathbf{U}_2 = \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}} \begin{vmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \\ a \end{vmatrix} \quad (1.6)$$

где $U_{\text{ном}}$ - номинальное линейное напряжение; δ - угловой сдвиг между напряжениями по концам линии; $a = e^{i2\pi/3}$ - фазный оператор.

Определив вектор-столбец фазных токов в конце линии

$$\mathbf{I}_2 = \mathbf{B}_{12}^{-1}((\mathbf{U}_1 - \mathbf{A}_{12}\mathbf{U}_2))$$

найдем вектор-столбец фазных токов в начале линии

$$\mathbf{I}_1 = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_{c1} \\ I_{c2} \end{bmatrix} = \mathbf{C}_{12}\mathbf{U}_2 + \mathbf{D}_{12}\mathbf{I}_2 \quad (1.7)$$

Учитывая, что ток в фазе «с» складывается из токов полуфаз «с1» и «с2», найдем для тока в начале линии

$$I_{1c} = I_{1c1} + I_{1c2}$$

И соответственно вектор - столбец трехфазного тока будет

$$\mathbf{I}_{1abc} = \begin{bmatrix} I_{1a} \\ I_{1b} \\ I_{1c} \end{bmatrix}$$

Для оценки уровня несимметрии, возникающей в схеме, определим вектор-столбец симметричных составляющих токов в начале линии

$$\mathbf{I}_{1sym} = \begin{bmatrix} I_{11} \\ I_{12} \\ I_{10} \end{bmatrix} = \mathbf{S}_{sym} \cdot \mathbf{I}_{1abc} \quad (1.8)$$

где $\mathbf{S}_{sym} = \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$ – матрица преобразования от фазных составляющих к

симметричным составляющим; I_{11}, I_{12}, I_{10} – соответственно токи прямой, обратной и нулевой последовательностей.

Коэффициент несимметрии по току обратной последовательности соответственно определится

$$K_{12} = I_{12} / I_{11} \quad (1.9)$$

Важной характеристикой схемы, определяющей её пропускную способность, является угловая характеристика, представляющая зависимость активной мощности, передаваемой по линии, от углового сдвига между напряжениями по концам линии. Так, полная мощность в начале линии определяется как скалярное произведение соответствующих векторов–столбцов напряжения и тока

$$S_1(\delta) = \mathbf{U}_{1abc}(\delta) \cdot \mathbf{I}_{1abc}(\delta)$$

где $\mathbf{U}_{1abc} = \frac{U_{ном}}{\sqrt{3}} e^{i\delta} \begin{vmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{vmatrix}$ – вектор-столбец фазных напряжений в начале линии.

Соответственно угловая характеристика схемы найдётся как

$$P_1(\delta) = \operatorname{Re} S_1(\delta) \quad (1.10)$$

Максимум угловой характеристики при $\delta = 90^\circ$ определяет предельную передаваемую мощность схемы

$$P_{1\max} = P_1(90^\circ)$$

Соответственно пропускная способность схемы уменьшается с учётом коэффициента запаса по статической устойчивости

$$P_{1\text{дон}} = \frac{P_{1\max}}{K_{зан}} \quad (1.11)$$

где $K_{зан}$ – коэффициент запаса по статической устойчивости, принимаемый равным $K_{зан} = 1,2$.

Основываясь на данном алгоритме, проведём анализ режима линии с полуфазами 500 кВ длиной 500 км, имея в виду уровень несимметрии, возникающей в ней, а также её пропускную способность, по сравнению с традиционной линией 500 кВ.

На рисунке 1.13 показано влияние величины УПК, устанавливаемых в двух фазах, на коэффициент несимметрии по обратной последовательности.

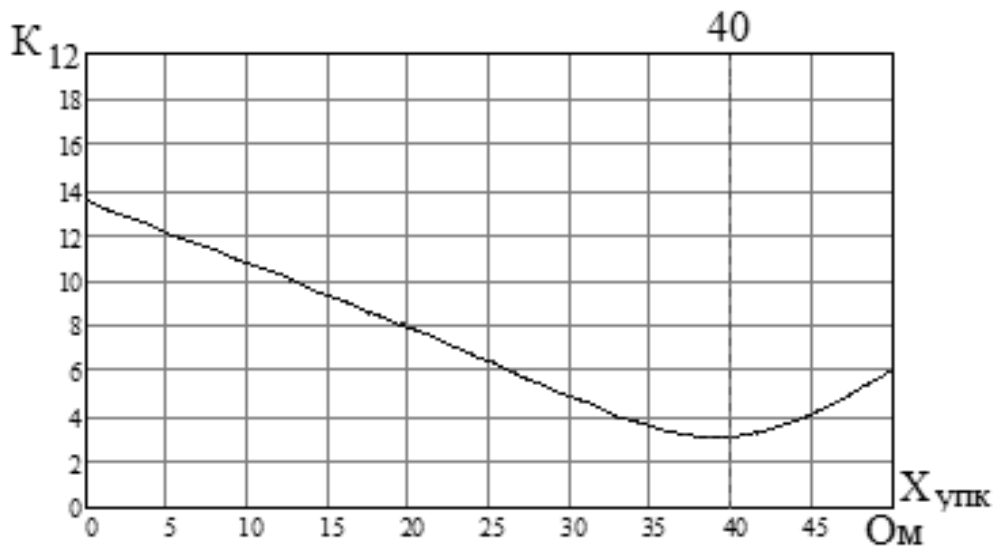


Рисунок 1.13 – Зависимость коэффициента несимметрии по обратной последовательности от величины УПК, включаемой в две фазы

При отсутствии двухфазного УПК на линии коэффициент несимметрии достигает 13,5%, что значительно превышает допустимую величину для синхронных генераторов, составляющую не более 6%. Наименьшее значение коэффициента несимметрии, равное 2,9%, имеет место при $X_{утк} = 40 \text{ Ом}$, что соответствует степени компенсации индуктивного сопротивления фаз, близкой к 50%.

Отметим, что коэффициент несимметрии по обратной последовательности может быть снижен до весьма малых величин, если по концам полуфаз подключить шунтирующие реакторы. При сравнительно небольшой мощности шунтирующих реакторов, составляющей не более 50 Мвар, коэффициент несимметрии по обратной последовательности снижается до 0,25%.

В таблице 1.3 приведено сопоставление пропускных способностей традиционной линии и линии с полуфазами. Линия с полуфазами обеспечивает двухкратное повышение пропускной способности по сравнению с одноцепной традиционной линией.

Таблица 1.3 – Сравнение пропускных способностей традиционной одноцепной линии и линии с полуфазами 500 кВ (длина линии 500 км)

Тип линии	Традиционная (одноцепная)	Линия с полуфазами
Пропускная способность, МВт	1460	2910
Соотношение пропускных способностей	2.0	

В традиционных линиях СВН подавляющее число отказов является однофазными. В соответствии с конструкцией четырёхпроводной трёхфазной линии наиболее вероятно возникновение отказов на одной из полуфаз или на фазах. При неустойчивых отказах на ЧТЛ, как и на традиционной линии, целесообразно использовать ОАПВ.

Заметная доля отказов является устойчивыми. Предложенная схема при возникновении устойчивых отказов позволяет перейти на работу в послеаварийном режиме с возможностью передачи не менее 50% мощности исходного максимального режима. Так, при устойчивом повреждении одной из полуфаз она отключается выключателями 2 (Рисунок 1.14а), и линия переходит на работу в послеаварийном режиме. При этом, чтобы обеспечить допустимый уровень несимметрии, необходимо зашунтировать УПК выключателями 1. В случае устойчивого повреждения одной из фаз, например, фазы b, она отключается выключателями 3, и вместо неё включается выключателями 4 соответствующая полуфаза, отключенная выключателями 2 от другой полуфазы. Чтобы обеспечить допустимый уровень несимметрии, необходимо в этом случае зашунтировать УПК выключателем 1 в фазе a, как это показано на рисунке 1.14б.

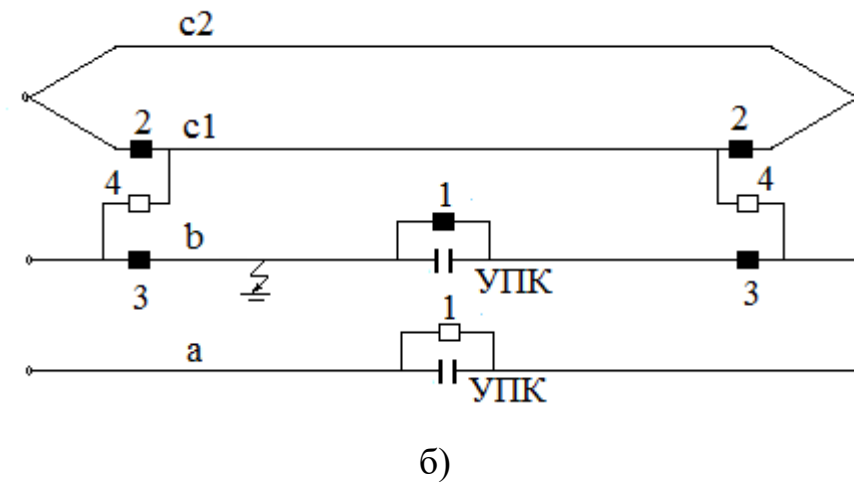
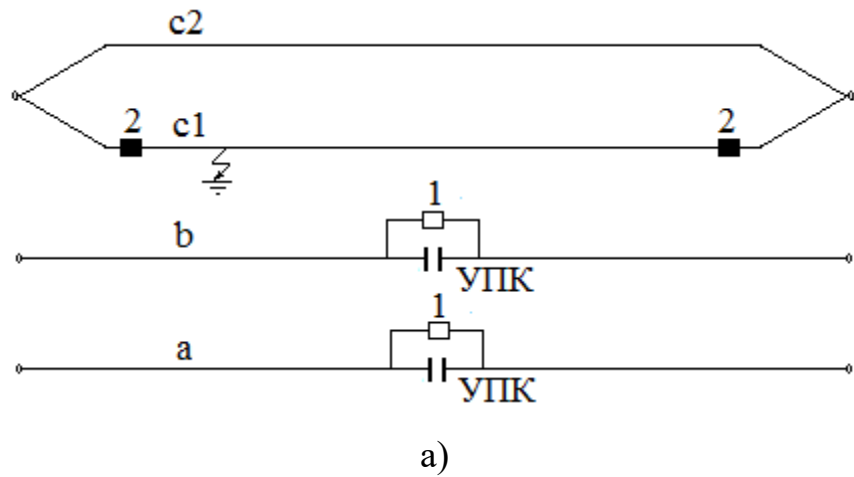


Рисунок 1.14 – Схемы послеаварийного режима при устойчивой аварии:
авария на полуфазе c1 (а); авария на фазе b (б)

Выводы по главе 1

1. Проведён обзор проработанных в настоящее время ВЛ сверхвысокого напряжения, включая традиционные линии, компактные и сверхкомпактные ВЛ, ВЛ с резервной фазой, шестифазные линии, управляемые самокомпенсирующиеся ВЛ и четырёхфазные линии. Отмечены недостатки перечисленных выше линий.

2. Дано краткое описание рассматриваемой в данной работе четырёхпроводной трёхфазной линии (линии с полуфазами), обладающей повышенной пропускной способностью и надёжностью.

ГЛАВА 2 ОБОСНОВАНИЕ РАСЧЕТНЫХ СХЕМ И АЛГОРИТМОВ ДЛЯ АНАЛИЗА ВТОРИЧНЫХ ТОКОВ ДУГИ И ВОССТАНАВЛИВАЮЩИХСЯ НАПРЯЖЕНИЙ

2.1 Общие положения и описание расчётной схемы

В четырёхпроводных трёхфазных линиях СВН, как и в традиционных линиях СВН, наиболее распространенными авариями являются однофазное короткие замыкания, большая часть которых может быть ликвидирована в паузу ОАПВ.

С точки зрения возмущающих воздействий на примыкающие системы существенное значение имеет способ ликвидации коротких замыканий в линии. Возникающие на линии неустойчивые ОКЗ сопровождаются минимальными возмущениями на примыкающие системы, если они ликвидируются в цикле однофазного автоматического повторного включения (ОАПВ). Исследование ОАПВ, перспективы применения и процессы при ОАПВ применительно к традиционным трёхфазным линиям посвящено много работ [34-41]. В этом случае повреждённую фазу линии отключают с двух сторон, а затем через определенное время, так называемую бестоковую паузу, автоматически повторно включают. За время бестоковой паузы остаточная дуга в месте перекрытия может погаснуть, а место перекрытия деионизироваться и почти полностью восстановить свою электрическую прочность. При эксплуатации линий СВН до 70 % однофазных коротких замыканий имеют неустойчивый характер, т.е. могут быть устранены в цикле кратковременной бестоковой паузы с последующим восстановлением нормальной схемы. Таким образом, ОАПВ относится к важнейшей мере, повышающей надёжность электропередач сверхвысокого напряжения.

Успешность ликвидации дуговых коротких замыканий в цикле ОАПВ, с одной стороны, определяются характеристикой дуги подпитки, возникающей в длинных воздушных промежутках, а с другой – эффективностью применяемых на линии способов снижения вторичных токов дуги и восстанавливаемых напряжений в месте горения дуги после её погасания.

Осуществление ОАПВ в электропередачах переменного тока затрудняется наличием подпитки места короткого замыкания со стороны неотключенных фаз. Режимными параметрами, определяющими условия гашения вторичной дуги, являются: вторичный ток дуги (ВТД), протекающей в дуге до её гашения, I_{∂} ; восстанавливающееся напряжение (ВН) в месте ОКЗ после погасания вторичной дуги, $U_{вн}$; скорость восстановления этого напряжения при гашении дуги.

Длительность горения вторичной дуги зависит и от других факторов, например, от первичного тока ОКЗ, определяющего предельную длину дуги и степень ионизации её канала, метеоусловий, влияющих на растягивание и охлаждение дуги, и других факторов, определяющих статистический характер времени горения дуги.

По имеющимся данным [35, 38] среднее время горения вторичной дуги в основном зависит от величины установившегося ВТД. Зависимость максимального времени гашения вторичной дуги от амплитуды, вынужденной составляющей вторичного тока дуги с достаточной точностью аппроксимируется следующим выражением

$$t_{\text{гаш}}(I_{\partial}) = 0,3 - 2,36 \cdot 10^{-3} \cdot I_{\partial} + 5,56 \cdot 10^{-4} \cdot I_{\partial}^2 \quad (2.1)$$

где I_{∂} – действующее значение вынужденной составляющей вторичного тока дуги, А.

При токах дуги более 63,6 А гашение вторичной дуги становится проблематичным.

Бестоковая пауза ОАПВ должна превышать время гашения дуги на 0,2 сек для обеспечения восстановления электрической прочности канала дуги. Кроме того, пауза не должна быть менее 0,5 сек, так как такое время надо для полной деионизации первоначального мощного канала дуги ОКЗ.

Максимальный эффект при применении ОАПВ можно заметить, при длительности паузы не более 1,0 сек, что требует ограничиваться значением ВТД до 31,8 А. Если длительность паузы ОАПВ превышает 2,0 сек, то не имеет существенного влияния на пропускную способность по условию динамики.

Режиму ОАПВ в общем случае соответствует расчётная схема на рисунке 2.1а, которая включает в свой состав участки линии, шунтирующие реакторы (ШР) по концам линии, устройства продольной компенсации (УПК) в средней части рабочих фаз, линейные выключатели и элемент, характеризующий дуговое замыкание. Аварийная ситуация рассматривается по концам линии (на рисунке 2.1 показана в начале линии), поскольку в этих случаях имеют место наибольшие ВТД. Для согласования трехфазных примыкающих систем с четырехпроводной линией используется приведённая схема, показанная на рисунке 2.1б.

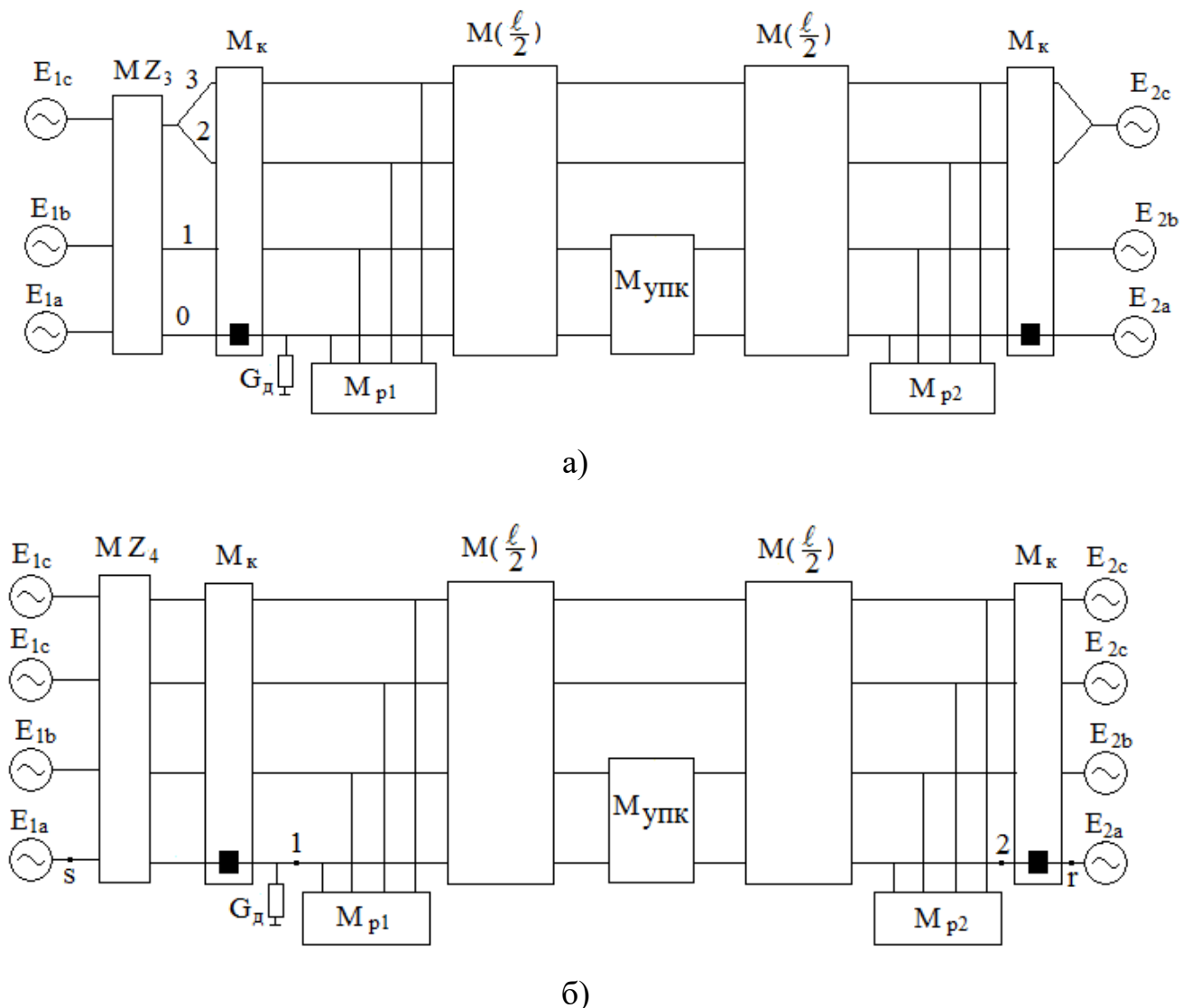


Рисунок 2.1 – Расчетная схема для анализа ВТД и ВН: исходная схема, моделирующая дугу на рабочей фазе Φ_0 (а); приведённая схема (б)

Подход для определения ВТД, реализованный в [42], затруднительно применить для столь сложной схемы. В целом алгоритм для определения ВТД строится следующим образом. Сначала определяется полная фазная матрица всей схемы согласно (2.2), а затем полная фазная матрица участка 1-г (2.3)

$$\mathbf{M}_{sr} = \mathbf{M}_{Z4} \cdot \mathbf{M}_{\kappa} \cdot \mathbf{M}_{\delta} \cdot \mathbf{M}_{p1} \cdot \mathbf{M}(\ell/2) \cdot \mathbf{M}_{ynk} \cdot \mathbf{M}(\ell/2) \cdot \mathbf{M}_{p2} \cdot \mathbf{M}_{\kappa} \quad (2.2)$$

$$\mathbf{M}_{1r} = \mathbf{M}(\ell/2) \cdot \mathbf{M}_{ynk} \cdot \mathbf{M}(\ell/2) \cdot \mathbf{M}_{p2} \cdot \mathbf{M}_{\kappa} \quad (2.3)$$

Далее определяются соответствующие подматрицы этих полных матриц

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{sr} &= \text{submatrix}(\mathbf{M}_{sr}, 0, 3, 0, 3), \\ \mathbf{B}_{sr} &= \text{submatrix}(\mathbf{M}_{sr}, 0, 3, 4, 7), \\ \mathbf{A}_{1r} &= \text{submatrix}(\mathbf{M}_{1r}, 0, 3, 0, 3), \\ \mathbf{B}_{1r} &= \text{submatrix}(\mathbf{M}_{1r}, 0, 3, 4, 7). \end{aligned} \quad (2.4)$$

Определив вектор-столбец фазных токов в конце схемы

$$\mathbf{I}_{r\phi} = \mathbf{B}_{sr}^{-1} (\mathbf{E}_{1\phi} - \mathbf{A}_{sr} \mathbf{E}_{2\phi}) \quad (2.5)$$

где $\mathbf{E}_1 = E_{1\phi} e^{i\delta} \begin{vmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \\ a \end{vmatrix}$, $\mathbf{E}_{2\phi} = \frac{500}{\sqrt{3}} \begin{vmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \\ a \end{vmatrix}$ – вектор - столбцы заданных ЭДС по концам

линии, $E_{1\phi}$ – модуль фазной ЭДС на отправном конце, δ угловой сдвиг между концевыми ЭДС, найдём вектор-столбец фазных напряжений в месте горения дуги

$$\mathbf{U}_{1\phi}(R_{\delta}) = \mathbf{A}_{1r} \mathbf{E}_{2\phi} + \mathbf{B}_{1r} \mathbf{I}_{r\phi}(R_{\delta}) \quad (2.6)$$

Затем определяется напряжение в месте горения вторичной дуги

$$U_{\delta}(R_{\delta}) = U_{1\phi}(R_{\delta}) \quad (2.7)$$

и ВТД

$$I_{\delta}(R_{\delta}) = \frac{U_{\delta}(R_{\delta})}{R_{\delta}} \quad (2.8)$$

ВТД зависит от сопротивления вторичной дуги, которое является нелинейной функцией ВТД. Принимая во внимание модель дуги, представленную в [37, 43], сопротивление дуги можно аппроксимировать следующим выражением

$$R_{\partial}(I_{\partial}) = \frac{A}{I_{\partial}^{\alpha}} \quad (2.9)$$

где для ВЛ 500 кВ $\alpha = 1,4$ и $A \approx 1,3 \cdot 10^5$.

Как показано в [44], для определения ВТД можно воспользоваться следующим нелинейным уравнением.

$$U_{ВН} = I_{\partial} \sqrt{X_{ВХ}^2 + \left(\frac{A}{I_{\partial}^{\alpha}}\right)^2} \quad (2.10)$$

где $U_{ВН}$ – ВН в месте возникновения дуги после её погасания; $X_{ВХ}$ – реактивная составляющая входного сопротивления пассивной электрической цепи со стороны места возникновения дуги при отсутствии дуги. Из (2.7) следует

$$U_{ВН} = U_{\partial}(R_{\partial} = 10^6) \quad (2.11)$$

Входное сопротивление относительно места дуги определится как

$$X_{ВХ} = \text{Im} \frac{U_{ВН}}{I_{КЗ}(R_{\partial} = 1 \text{ Ом})} \quad (2.12)$$

где $I_{КЗ}(R_{\partial} = 1 \text{ Ом}) = \frac{U_{\partial}(R_{\partial} = 1)}{R_{\partial} = 1}$ – ток в месте дуги при её шунтировании.

Наиболее просто ВТД определяется путём графического решение вышеприведённого нелинейного уравнения.

2.2 Математическая модель линии в фазных координатах

Предшествующее ОАПВ однофазное повреждение приводит к срабатыванию искровых промежутков, которыми тросы отделены от земли в нормальных режимах. Заземление тросов изменяет параметры линии, что следует учитывать при анализе режимов в цикле ОАПВ.

Схема расположения фаз и тросов линии над землёй изображена на рисунке 2.2

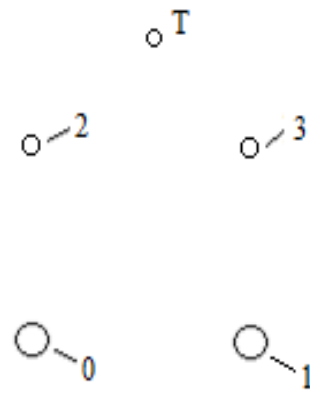


Рисунок 2.2 – Расположение фаз и троса ЧТЛ над землёй

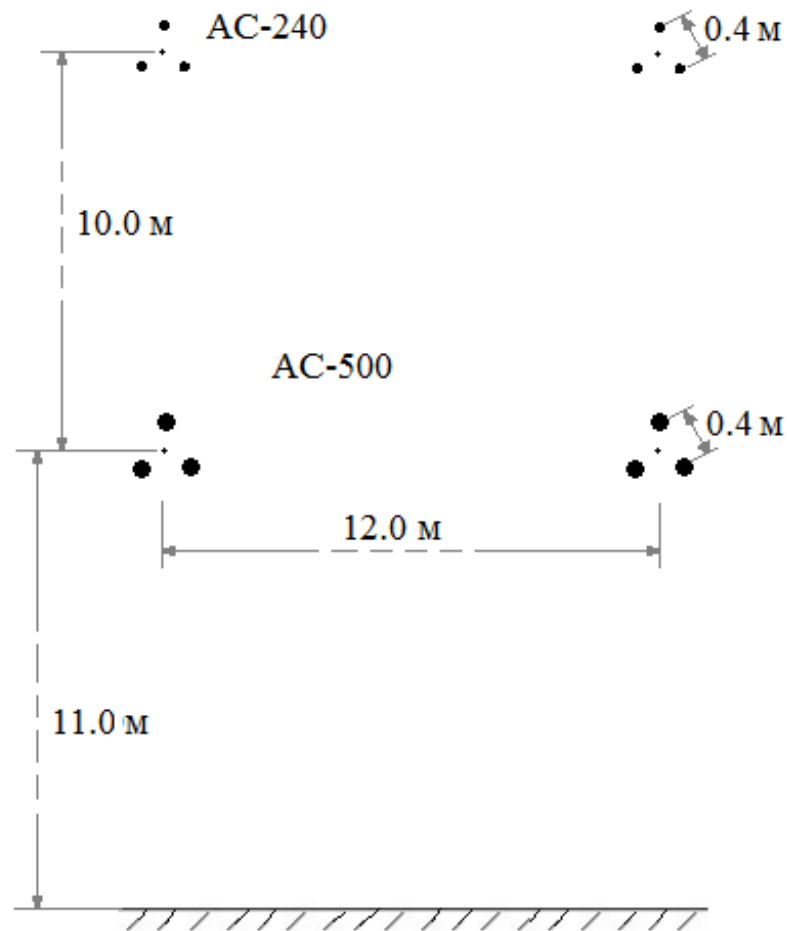


Рисунок 2.3 – Традиционная конструкция фаз и полуфаз (вариант I)

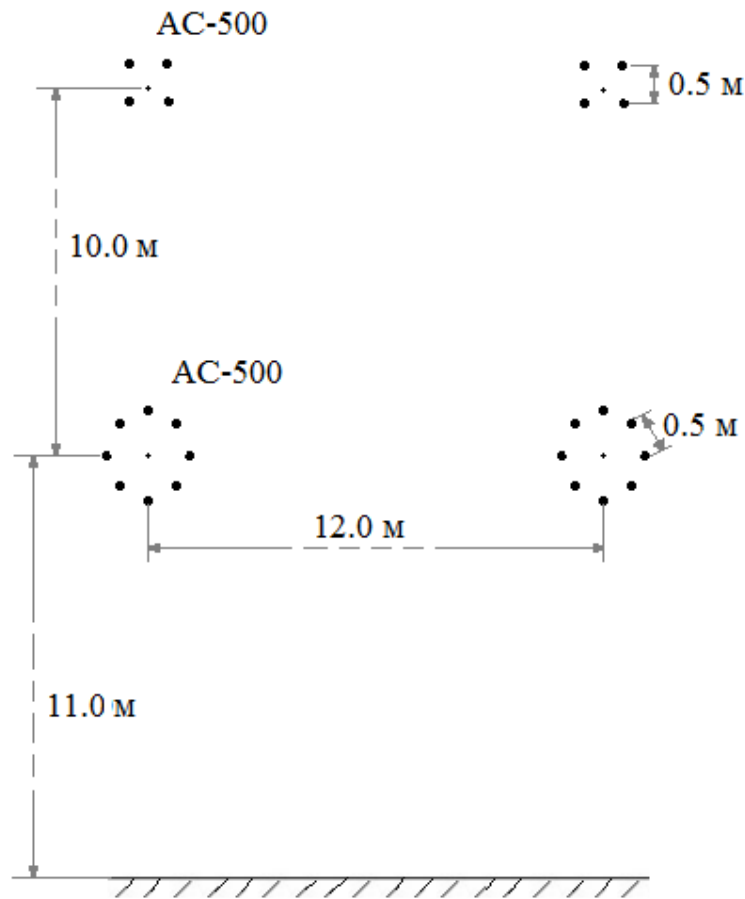


Рисунок 2.4 – Расширенная конструкция фаз и полуфаз (вариант II)

Натуральная мощность ЧТЛ и пропускная способность в целом электропередачи существенно зависят от конструкции фаз и полуфаз. В дальнейшем рассмотрим два варианта линии с полуфазами, а именно вариант I с традиционной конструкцией фаз и полуфаз, изображенный на рисунке 2.3, и вариант II с расширенной конструкцией фаз и полуфаз, изображенной на рисунке 2.4. Вариант I характеризуется натуральной мощностью 1400 МВт, а вариант II обеспечивает натуральную мощность 1800 МВт.

Установившиеся процессы в ЧТЛ с учётом тросов описываются следующими телеграфными уравнениями [45]

$$\begin{aligned}
 -\frac{dU}{dx} &= Z \cdot I, \\
 -\alpha \frac{dI}{dx} &= j\omega U,
 \end{aligned}
 \tag{2.13}$$

где $\dot{\mathbf{U}} = \begin{vmatrix} U_0 \\ U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_T \end{vmatrix}$, $\dot{\mathbf{I}} = \begin{vmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_T \end{vmatrix}$ – вектор-столбцы соответственно комплексных величин

напряжений и токов в фазных проводах и тросе в точке x линии.

Квадратная матрица удельных продольных сопротивлений определяется как

$$\mathbf{Z} = j\omega\mathbf{L}$$

где $\omega = 2\pi f$ – угловая частота переменного тока на частоте f ; \mathbf{L} – квадратная матрица удельных индуктивностей линии с учётом троса.

$$\mathbf{L} = \begin{vmatrix} L_{00} & L_{01} & L_{02} & L_{03} & L_{0T} \\ L_{10} & L_{11} & L_{12} & L_{13} & L_{1T} \\ L_{20} & L_{21} & L_{22} & L_{23} & L_{2T} \\ L_{30} & L_{31} & L_{32} & L_{33} & L_{3T} \\ L_{T0} & L_{T1} & L_{T2} & L_{T3} & L_{TT} \end{vmatrix} \quad (2.14)$$

Собственные и взаимные индуктивности линии соответственно вычисляются как

$$L_{ii} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_3}{R_{\vartheta i}}, \quad L_{ij} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_3}{D_{ij}}$$

где $i = 0, 1, 2, 3, T$; $j = 0, 1, 2, 3, T$.

Квадратная матрица удельных потенциальных коэффициентов определяется как

$$\boldsymbol{\alpha} = \begin{vmatrix} \alpha_{00} & \alpha_{01} & \alpha_{02} & \alpha_{03} & \alpha_{0T} \\ \alpha_{10} & \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} & \alpha_{1T} \\ \alpha_{20} & \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} & \alpha_{2T} \\ \alpha_{30} & \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} & \alpha_{3T} \\ \alpha_{T0} & \alpha_{T1} & \alpha_{T2} & \alpha_{T3} & \alpha_{TT} \end{vmatrix} \quad (2.15)$$

Потенциальные коэффициенты вычисляются по известным соотношениям

$$\alpha_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{H_{ii}}{R_{\phi i}},$$

$$\alpha_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{H_{ij}}{D_{ij}},$$

где $i = 0, 1, 2, 3, T$; $j = 0, 1, 2, 3, T$.

При самом общем подходе, когда исследуется режим не только в рабочих фазах, но и в тросах, задача решается путём перехода к модальным координатам путём соответствующих операций с векторами и матрицами 5-го порядка.

Однако при анализе ОАПВ ставится задача определения режима в самой линии. Поэтому выясним, каким образом сказывается влияние тросов на режим фаз и полуфаз.

Перепишем уравнения (2.13), разбив их на подсистемы относительно фазных и тросовых переменных

$$-\frac{d\mathbf{U}_{\phi}}{dx} = j\omega\mathbf{L}'_{\phi} \cdot \mathbf{I}_{\phi} + j\omega\mathbf{L}_{\phi T} \cdot \mathbf{I}_T, \quad (2.16)$$

$$-\frac{d\mathbf{U}_T}{dx} = j\omega\mathbf{L}_{T\phi} \cdot \mathbf{I}_{\phi} + j\omega\mathbf{L}_T \cdot \mathbf{I}_T, \quad (2.17)$$

$$-\mathbf{a}'_{\phi} \frac{d\mathbf{I}_{\phi}}{dx} - \mathbf{a}_{\phi T} \frac{d\mathbf{I}_T}{dx} = j\omega\mathbf{U}_{\phi}, \quad (2.18)$$

$$-\mathbf{a}_{T\phi} \frac{d\mathbf{I}_{\phi}}{dx} - \mathbf{a}_T \frac{d\mathbf{I}_T}{dx} = j\omega\mathbf{U}_T \quad (2.19)$$

где $\mathbf{L}'_{\phi} = \begin{vmatrix} L_{00} & L_{01} & L_{02} & L_{03} \\ L_{10} & L_{11} & L_{12} & L_{13} \\ L_{20} & L_{21} & L_{22} & L_{23} \\ L_{30} & L_{31} & L_{32} & L_{33} \end{vmatrix}$, $\mathbf{L}_{\phi T} = \begin{vmatrix} L_{0T} \\ L_{1T} \\ L_{2T} \\ L_{3T} \end{vmatrix}$, $\mathbf{L}_{T\phi} = \begin{vmatrix} L_{T0} & L_{T1} & L_{T2} & L_{T3} \end{vmatrix}$, $\mathbf{L}_T = L_{TT}$ –

соответствующие подматрицы, составляющие матрицу удельных продольных сопротивлений согласно (2.14);

$$\mathbf{a}'_{\phi} = \begin{vmatrix} \alpha_{00} & \alpha_{01} & \alpha_{02} & \alpha_{03} \\ \alpha_{10} & \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{20} & \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{30} & \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{vmatrix}, \mathbf{a}_{\phi T} = \begin{vmatrix} \alpha_{0T} \\ \alpha_{1T} \\ \alpha_{2T} \\ \alpha_{3T} \end{vmatrix}, \mathbf{a}_{T\phi} = \begin{vmatrix} \alpha_{T0} & \alpha_{T1} & \alpha_{T2} & \alpha_{T3} \end{vmatrix}, \mathbf{a}_T = \alpha_{TT}$$

соответствующие подматрицы, составляющие матрицу удельных потенциальных коэффициентов согласно (2.15).

При заземлённых тросах имеет место

$$U_T \approx 0 \quad (2.20)$$

Учитывая это соотношение, найдем соответственно из (2.17) и (2.19)

$$\mathbf{I}_T = -\mathbf{L}_T^{-1} \mathbf{L}_{T\phi} \cdot \mathbf{I}_\phi, \quad (2.21)$$

$$\frac{d\mathbf{I}_T}{dx} = -\mathbf{a}_T^{-1} \mathbf{a}_{T\phi} \frac{d\mathbf{I}_\phi}{dx} \quad (2.22)$$

После подстановки (2.21) в (2.16) и (2.22) в (2.18) запишем телеграфные уравнения ЧТЛ относительно фазных составляющих с учётом тросов

$$-\frac{d\mathbf{U}_\phi}{dx} = j\omega \mathbf{L}_\phi \cdot \mathbf{I}_\phi = j\omega (\mathbf{L}'_\phi - \Delta \mathbf{L}_\phi) \cdot \mathbf{I}_\phi \quad (2.23)$$

$$-(\mathbf{a}'_\phi - \Delta \mathbf{a}_\phi) \frac{d\mathbf{I}_\phi}{dx} = -\mathbf{a}_\phi \frac{d\mathbf{I}_\phi}{dx} = j\omega \mathbf{U}_\phi \quad (2.24)$$

$$\text{где } \Delta \mathbf{L}_\phi = \mathbf{L}_{\phi T} \mathbf{L}_T^{-1} \mathbf{L}_{T\phi} = \begin{vmatrix} \Delta L_{00} & \Delta L_{01} & \Delta L_{02} & \Delta L_{03} \\ \Delta L_{10} & \Delta L_{11} & \Delta L_{12} & \Delta L_{13} \\ \Delta L_{20} & \Delta L_{21} & \Delta L_{22} & \Delta L_{23} \\ \Delta L_{30} & \Delta L_{31} & \Delta L_{32} & \Delta L_{33} \end{vmatrix},$$

$$\Delta \mathbf{a}_\phi = \mathbf{a}_{\phi T} \mathbf{a}_T^{-1} \mathbf{a}_{T\phi} = \begin{vmatrix} \Delta \alpha_{00} & \Delta \alpha_{01} & \Delta \alpha_{02} & \Delta \alpha_{03} \\ \Delta \alpha_{10} & \Delta \alpha_{11} & \Delta \alpha_{12} & \Delta \alpha_{13} \\ \Delta \alpha_{20} & \Delta \alpha_{21} & \Delta \alpha_{22} & \Delta \alpha_{23} \\ \Delta \alpha_{30} & \Delta \alpha_{31} & \Delta \alpha_{32} & \Delta \alpha_{33} \end{vmatrix} - \text{ матрицы, с помощью которых}$$

учитывается влияние заземлённых тросов на фазовые параметры линии.

Система дифференциальных уравнений (2.23, 2.24) является взаимосвязанной системой, и поэтому нельзя воспользоваться решением в форме однопроводной длинной линии.

Задача решается путём использования модальных координат для перехода от взаимосвязанной системы уравнений к уравнениям относительно несвязанных

между собой модальных переменных, так называемых мод. В качестве преобразующей матрицы для перехода к модальным составляющим принимается [46].

$$S_M = \text{eigenvecs}(\mathbf{L}_\phi \mathbf{a}_\phi^{-1}) \quad (2.25)$$

которая определяется в результате нахождения собственных векторов матрицы $\mathbf{L}_\phi \mathbf{a}_\phi^{-1}$.

Фазные напряжения и токи соотносятся с модальными величинами соотношениями

$$\begin{aligned} \dot{U}_\phi &= S_M \dot{U}_M, \\ \dot{I}_\phi &= (S_M)_t^{-1} \dot{I}_M, \end{aligned} \quad (2.26)$$

где $\dot{U}_M = \begin{vmatrix} \dot{U}_{M1} \\ \dot{U}_{M2} \\ \dot{U}_{M3} \\ \dot{U}_{M4} \end{vmatrix}$, $\dot{I}_M = \begin{vmatrix} \dot{I}_{M1} \\ \dot{I}_{M2} \\ \dot{I}_{M3} \\ \dot{I}_{M4} \end{vmatrix}$ – вектор-столбцы 4-го порядка для модальных

составляющих напряжения и тока.

Соответственно обратный переход осуществляется согласно соотношениям

$$\begin{aligned} \dot{U}_M &= S_M^{-1} \dot{U}_\phi, \\ \dot{I}_M &= (S_M)_t \dot{I}_\phi. \end{aligned} \quad (2.27)$$

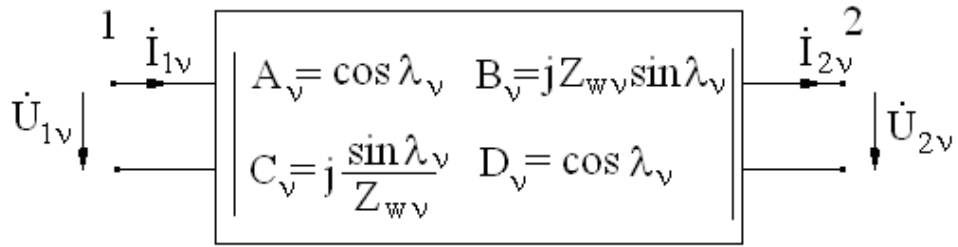
Для каждой модальной переменной получаем решение, аналогичное для однопроводной линии, которое характеризуется следующей матрицей параметров для участка линии длиной x

$$\mathbf{M}_{1\nu}(x) = \begin{vmatrix} \cos \beta_\nu x & Z_{w,\nu} \cdot j \sin \beta_\nu x \\ \frac{j \sin \beta_\nu x}{Z_{w,\nu}} & \cos \beta_\nu x \end{vmatrix} \quad (2.28)$$

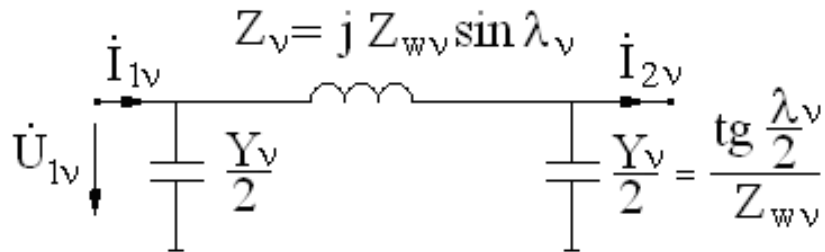
где $\nu = 1, 2, 3, 4$; $Z_{w,\nu} = \sqrt{\frac{L_\nu}{C_\nu}}$ – волновое сопротивление для ν -ой моды; β_ν –

коэффициент фазы для ν -ой моды.

Каждая мода может быть представлена 4-полюсником и соответствующей П-образной схемой замещения, как показано на рисунке 2.5.



а)



б)

Рис. 2.5. – Изображение ν – ой моды: в виде четырёхполюсника (а);
в виде П-образной схемы замещения (б)

Диагональные матричные коэффициенты, составленные из коэффициентов 4-полюсников для соответствующих мод, имеют вид

$$\mathbf{A}_M(x) = \begin{vmatrix} A_1(x) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_2(x) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_3(x) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_4(x) \end{vmatrix},$$

$$\mathbf{B}_M(x) = \begin{vmatrix} B_1(x) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & B_2(x) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & B_3(x) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & B_4(x) \end{vmatrix},$$

$$\mathbf{C}_{\mathcal{M}}(x) = \begin{vmatrix} C_1(x) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_2(x) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_3(x) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_4(x) \end{vmatrix},$$

$$\mathbf{D}_{\mathcal{M}}(x) = \begin{vmatrix} D_1(x) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & D_2(x) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D_3(x) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_4(x) \end{vmatrix}.$$

Переход от независимых мод к фазным величинам происходит с помощью ранее приведенных соотношений (2.26). В результате матричные фазные коэффициенты найдутся из следующих соотношений

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{\phi}(x) &= \mathbf{S}_{\mathcal{M}} \mathbf{A}_{\mathcal{M}}(x) \mathbf{S}_{\mathcal{M}}^{-1}, & \mathbf{B}_{\phi}(x) &= \mathbf{S}_{\mathcal{M}} \mathbf{B}_{\mathcal{M}}(x) (\mathbf{S}_{\mathcal{M}})_t, \\ \mathbf{C}_{\phi}(x) &= (\mathbf{S}_{\mathcal{M}})_t^{-1} \mathbf{C}_{\mathcal{M}}(x) \mathbf{S}_{\mathcal{M}}^{-1}, & \mathbf{D}_{\phi}(x) &= (\mathbf{S}_{\mathcal{M}})_t^{-1} \mathbf{D}_{\mathcal{M}}(x) (\mathbf{S}_{\mathcal{M}})_t. \end{aligned} \quad (2.29)$$

Таким образом, полная матрица, связывающая фазные переменные по концам участка x принимает вид

$$\mathbf{M}_{\phi}(x) = \begin{vmatrix} \mathbf{A}_{\phi}(x) & \mathbf{B}_{\phi}(x) \\ \mathbf{C}_{\phi}(x) & \mathbf{D}_{\phi}(x) \end{vmatrix}, \quad (2.30)$$

где

$$\mathbf{A}_{\phi}(x) = \begin{vmatrix} A_{00}(x) & A_{01}(x) & A_{02}(x) & A_{03}(x) \\ A_{10}(x) & A_{11}(x) & A_{12}(x) & A_{13}(x) \\ A_{20}(x) & A_{21}(x) & A_{22}(x) & A_{23}(x) \\ A_{30}(x) & A_{31}(x) & A_{32}(x) & A_{33}(x) \end{vmatrix},$$

$$\mathbf{B}_{\phi}(x) = \begin{vmatrix} B_{00}(x) & B_{01}(x) & B_{02}(x) & B_{03}(x) \\ B_{10}(x) & B_{11}(x) & B_{12}(x) & B_{13}(x) \\ B_{20}(x) & B_{21}(x) & B_{22}(x) & B_{23}(x) \\ B_{30}(x) & B_{31}(x) & B_{32}(x) & B_{33}(x) \end{vmatrix},$$

$$C_{\phi}(x) = \begin{vmatrix} C_{00}(x) & C_{01}(x) & C_{02}(x) & C_{03}(x) \\ C_{10}(x) & C_{11}(x) & C_{12}(x) & C_{13}(x) \\ C_{20}(x) & C_{21}(x) & C_{22}(x) & C_{23}(x) \\ C_{30}(x) & C_{31}(x) & C_{32}(x) & C_{33}(x) \end{vmatrix},$$

$$D_{\phi}(x) = \begin{vmatrix} D_{00}(x) & D_{01}(x) & D_{02}(x) & D_{03}(x) \\ D_{10}(x) & D_{11}(x) & D_{12}(x) & D_{13}(x) \\ D_{20}(x) & D_{21}(x) & D_{22}(x) & D_{23}(x) \\ D_{30}(x) & D_{31}(x) & D_{32}(x) & D_{33}(x) \end{vmatrix} - \text{матричные фазные}$$

коэффициенты для участка линии длиной x .

В общем случае имеет место тождество

$$A_{\phi}(x) \cdot D_{\phi}^T(x) - B_{\phi}(x) \cdot C_{\phi}^T(x) = I_4, \quad (2.31)$$

где $I_4 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$ – единичная матрица 4-го порядка.

При анализе режимов представляет интерес П-образная схема замещения ЧТЛ в фазных координатах (Рисунок 2.6).

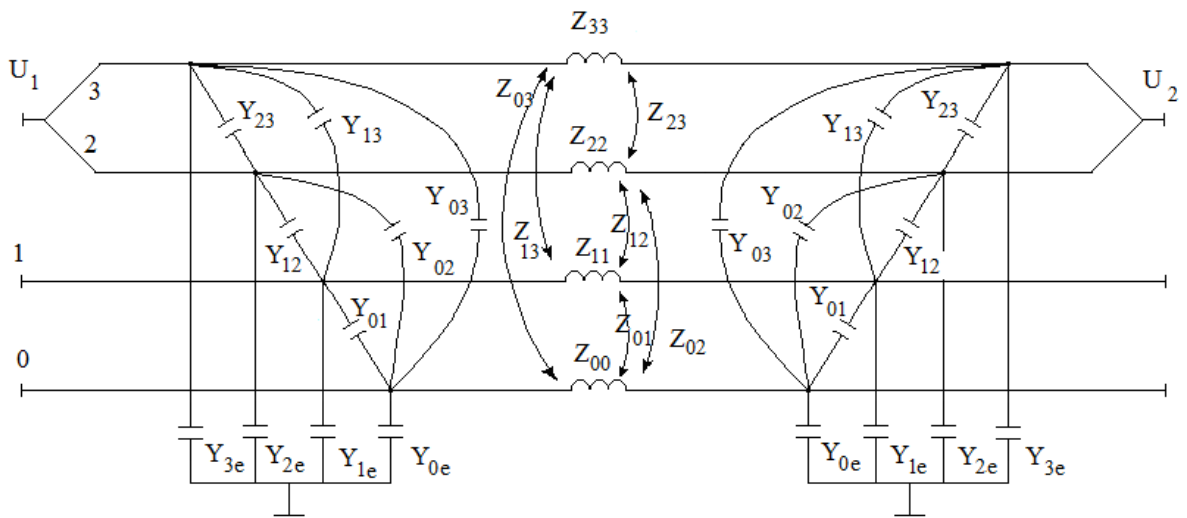


Рисунок 2.6 – П-образная схема замещения четырёхпроводной трёхфазной линии

Для определения равенства матриц параметров линии и её фазных коэффициентов воспользуемся следующими выражениями

$$\mathbf{Z}_\phi = \mathbf{B}_\phi = \begin{vmatrix} Z_{00} & Z_{01} & Z_{02} & Z_{03} \\ Z_{10} & Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} \\ Z_{20} & Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} \\ Z_{30} & Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} \end{vmatrix}$$

$$\frac{\mathbf{Y}_{н\phi}}{2} = (\mathbf{D}_\phi - \mathbf{I}_4) \mathbf{B}_\phi^{-1} = \begin{vmatrix} Y_{н00} & Y_{н01} & Y_{н02} & Y_{н03} \\ Y_{н10} & Y_{н11} & Y_{н12} & Y_{н13} \\ Y_{н20} & Y_{н21} & Y_{н22} & Y_{н23} \\ Y_{н30} & Y_{н31} & Y_{н32} & Y_{н33} \end{vmatrix}, \quad (2.32)$$

$$\frac{\mathbf{Y}_{к\phi}}{2} = \mathbf{B}_\phi^{-1} (\mathbf{A}_\phi - \mathbf{I}_4) = \begin{vmatrix} Y_{к00} & Y_{к01} & Y_{к02} & Y_{к03} \\ Y_{к10} & Y_{к11} & Y_{к12} & Y_{к13} \\ Y_{к20} & Y_{к21} & Y_{к22} & Y_{к23} \\ Y_{к30} & Y_{к31} & Y_{к32} & Y_{к33} \end{vmatrix}$$

Необходимо отметить, что проводимости на землю отличаются от собственных проводимостей, их взаимосвязь описывается выражениям

$$Y_{nie} = Y_{nii} - \sum_{j \neq i} Y_{nij}, \quad Y_{kie} = Y_{kii} - \sum_{j \neq i} Y_{kij}.$$

где $i = 0, 1, 2, 3$; $j = 0, 1, 2, 3$.

2.3 Математические модели элементов, входящих в состав расчётной схемы

2.3.1 Матрица установки продольной компенсации

Одним из основных элементов схемы является УПК, полная матрица которой была дана в главе 1.

2.3.2 Матрица шунтирующих реакторов

Другим основным элементом схемы являются шунтирующие реакторы (ШР), расположенные по концам линии. В общем случае могут использоваться неуправляемые ШР (НШР) [47] и управляемые ШР (УШР) [48], в нейтраль которых подключаются так называемые нулевые реакторы [49], которые используются для компенсации вторичных токов дуги (Рисунок 2.7).

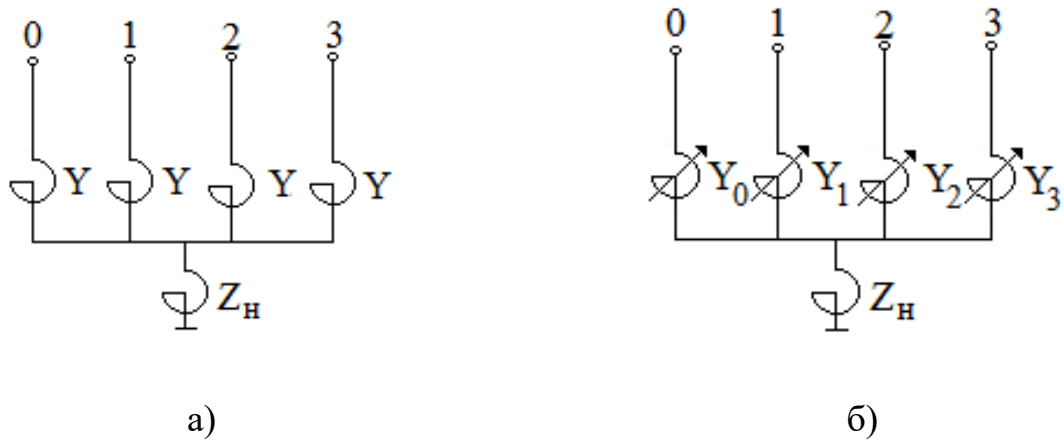


Рисунок 2.7 – Схема ШР с нулевым реактором в его нейтрали:
НШР (а); УШР (б)

Полная матрица НШР с учётом нулевого реактора запишется

$$\mathbf{M}_{шр} = \begin{vmatrix} \mathbf{1}_4 & \mathbf{0}_4 \\ \mathbf{Y}_{шр} & \mathbf{1}_4 \end{vmatrix}, \quad (2.33)$$

где $\mathbf{Y}_{шр} = \mathbf{Z}_{шр}^{-1}$,

$$\mathbf{Z}_{шр} = \begin{vmatrix} Z_{шр} + Z_n & Z_n & Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_{шр} + Z_n & Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_n & Z_{шр} + Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_n & Z_n & Z_{шр} + Z_n \end{vmatrix} \quad (2.34)$$

где $Z_{шр} = \frac{1}{Y_{шр}}$ – фазное сопротивление шунтирующего реактора, $Z_H = jX_H$ – сопротивление нейтрального (нулевого) реактора.

Полная матрица УШР с учётом нулевого реактора запишется

$$\mathbf{M}_{ушр} = \begin{vmatrix} \mathbf{1}_4 & \mathbf{0}_4 \\ \mathbf{Y}_{ушр} & \mathbf{1}_4 \end{vmatrix}, \quad (2.35)$$

где $\mathbf{Y}_{ушр} = \mathbf{Z}_{ушр}^{-1}$,

$$\mathbf{Z}_{ушр} = \begin{vmatrix} Z_0 + Z_H & Z_H & Z_H & Z_H \\ Z_H & Z_1 + Z_H & Z_H & Z_H \\ Z_H & Z_H & Z_2 + Z_H & Z_H \\ Z_H & Z_H & Z_H & Z_3 + Z_H \end{vmatrix},$$

$Z_i = \frac{1}{Y_i}$ – фазное сопротивление шунтирующего реактора ($i = 0, 1, 2, 3$),

$Z_H = jX_H$ – сопротивление нейтрального (нулевого) реактора.

2.3.3 Матрица линейного выключателя

Матрица линейного выключателя представляет из себя матрицу коммутаций и используется для моделирования состояния выключателя. Модель выключателя в предлагаемой четырёхпроводной линии выглядит как показано на рисунке 2.8.

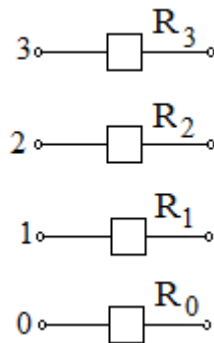


Рисунок 2.8 – Модель состояния выключателей в четырёхпроводной линии

Включенное состояние выключателя соответствует нулевому значению его сопротивления, а отключенное состояние – бесконечно большому сопротивлению.

Для корректности расчёта бесконечно большое сопротивление достаточно принять равным $R_{\nu}=10^6 \text{ Ом}$

Матрица коммутаций в фазных координатах выглядит так

$$M_K = \begin{vmatrix} I_3 & R_K \\ 0_3 & I_3 \end{vmatrix} \quad (2.36)$$

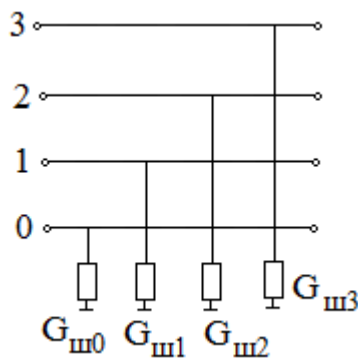
$$\text{где } R_K = \begin{vmatrix} R_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_3 \end{vmatrix}$$

Например, при отключенных фазах «2» и «3» матрица коммутаций выглядит

$$\text{следующим образом } R_K = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10^6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10^6 \end{vmatrix}.$$

2.3.4 Матрица шунтирующего выключателя

Для моделирования разных состояний фаз шунтирующих выключателей вводится соответствующая матрица. На рисунке 2.9 представлена схема для моделирования состояние шунтирующего выключателя в четырёхпроводной трёхфазной линии.



Рисунке 2.9 – Схема для моделирования шунтирующего выключателя

В предыдущем случае для моделирования линейного выключателя использовалось сопротивление выключателя, для моделирования же шунтирующего выключателя будем использовать проводимость. Если проводимость фазы шунтирующего выключателя равна нулю, то моделируется незашунтированное состояние фазы. Шунтирование фазы моделируется бесконечно большой проводимостью. Для корректности расчёта бесконечно большую проводимость достаточно принять равной $G_V \approx 10 \text{ См}$.

Матрица ШВ в фазных координатах выглядит следующим образом

$$M_{ш} = \begin{vmatrix} I_4 & 0_4 \\ G_{ш} & I_4 \end{vmatrix} \quad (2.37)$$

где $G_{ш} = \begin{vmatrix} G_{ш0} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & G_{ш1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & G_{ш2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_{ш3} \end{vmatrix}$.

Например, матрица вида $G_{ш} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$ показывает, что фаза «2»

зашунтирована.

2.3.5 Матрица повреждений

На рисунке 2.10 показана схема, иллюстрирующая различные КЗ в четырёхпроводной трёхфазной линии. Матрица повреждений для описания наличия КЗ характеризуется проводимостью.

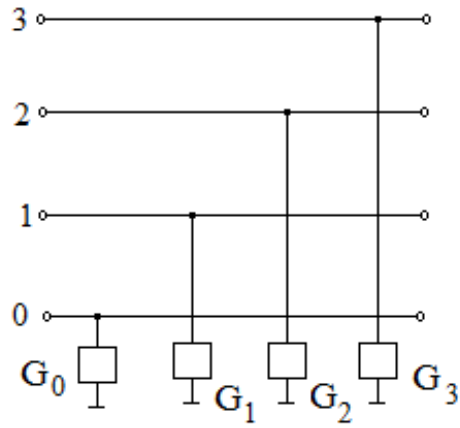


Рисунок 2.10 – Схема для моделирования КЗ

Для моделирования нормального состояние фазы приравниваем к нулю её проводимость. Короткое замыкания на фазе моделируется бесконечно большой проводимостью. Для корректности расчёта бесконечно большую проводимость достаточно принять равной $G_v \approx 1 \text{ См}$.

Матрица повреждений в фазных координатах выглядит следующим образом

$$M_{II} = \begin{vmatrix} I_4 & 0_4 \\ G_{II} & I_4 \end{vmatrix} \quad (2.38)$$

$$\text{где } G_{II} = \begin{vmatrix} G_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & G_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & G_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_3 \end{vmatrix}.$$

Например, матрица вида $G_{II} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$ показывает наличие КЗ на

фазах «2» и «3».

2.3.6 Матрица дуги

$$M_{\partial} = \begin{vmatrix} \mathbf{1}_4 & \mathbf{0}_4 \\ \mathbf{G}_{\partial} & \mathbf{1}_4 \end{vmatrix} \quad (2.39)$$

где $\mathbf{G}_{\partial} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{R_{\partial}} \end{bmatrix}$ – матрица дуги для полуфазы «3».

Проводимость дуги занимает соответствующее место на главной диагонали матрицы дуги в зависимости от фазы или полуфазы, на которой имеет место дуга.

2.3.7 Матрица сопротивления отправной системы

Фазные сопротивления отправной системы определяются как

$$\mathbf{Z}_{\phi 3} = \mathbf{S}_{sym}^{-1} \mathbf{Z}_{sym} \mathbf{S}_{sym} = \begin{vmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{vmatrix}, \quad (2.40)$$

где $\mathbf{S}_{sym} = \frac{1}{3} \begin{vmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}$ – матрица преобразования симметричных составляющих к

фазным [50]; $a = e^{i\frac{2\pi}{3}}$ – оператор преобразования;

$$\mathbf{Z}_{sym} = \begin{vmatrix} Z_1 & 0 & 0 \\ 0 & Z_2 & 0 \\ 0 & 0 & Z_0 \end{vmatrix} \text{ – симметричные сопротивления отправной системы.}$$

Матрица фазных сопротивлений отправной системы в четырёхфазном виде определяется как

$$MZ_4 = \begin{vmatrix} \mathbf{1}_4 & \mathbf{Z}_{\phi 4} \\ \mathbf{0}_4 & \mathbf{1}_4 \end{vmatrix} \quad (2.41)$$

$$\text{где } \mathbf{Z}_{\phi 4} = \begin{vmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} & Z_{cc} \\ Z_{ca} & Z_{ca} & Z_{ca} & Z_{cc} \end{vmatrix}.$$

Выводы по главе 2

1. Предложены два варианта конструкций четырёхпроводной трёхфазной линии для дальнейшего рассмотрения. Вариант I имеет традиционную конструкцию фаз и полуфаз, вариант II характеризуется расширенной конструкцией фаз и полуфаз.

2. Разработана математическая модель четырёхпроводной трёхфазной линии в фазных координатах для расчёта установившихся процессов. Приведена П-образная схема замещения линии с полуфазами в фазных координатах. Дано соотношение между параметрами схемы замещения и матричными фазными коэффициентами четырёхпроводной трёхфазной линии.

3. Даны математические модели сопутствующих сосредоточенных элементов в фазных координатах, таких как неуправляемые и управляемые шунтирующие реакторы, линейный выключатель, однофазное повреждение, дуговое замыкание, сопротивление отправной станции.

ГЛАВА 3 ПРИМЕНЕНИЕ ОДНОФАЗНОГО АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОВТОРНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ ПРИ ЛИКВИДАЦИИ НЕУСТОЙЧИВЫХ АВАРИЙ НА ЧЕТЫРЁХПРОВОДНОЙ ТРЁХФАЗНОЙ ЛИНИИ

3.1 Осуществление однофазного автоматического повторного включения в схемах с неуправляемыми шунтирующими реакторами

3.1.1 П-образная схема замещения четырёхпроводной трёхфазной линии и пути компенсации вторичного тока дуги

На рисунке 3.1 показана схема замещения ЧТЛ для расчётов установившихся ВН и ВТД в схемах с НШР для определённости при дуговом замыкании в начале фазы «0».

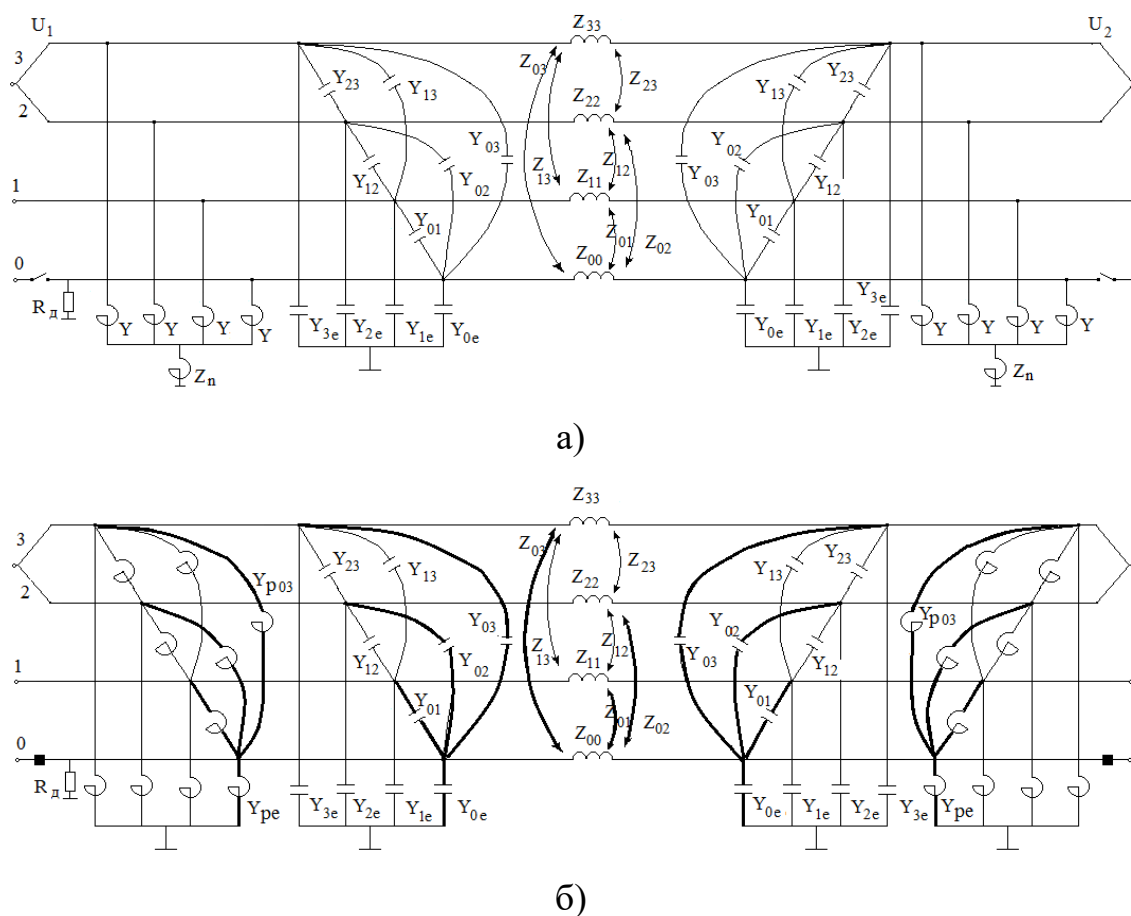


Рисунок 3.1 – Схема замещения ЧТЛ при ОАПВ в фазе «0»: исходная схема (а);
преобразованная схема (б)

Жирными линиями показаны связи, которые создают электростатическую подпитку ВТД (Y_{01}, Y_{02}, Y_{03}) и электромагнитную подпитку ВТД (Z_{01}, Z_{02}, Z_{03}). Поскольку в нетранспонированной линии межфазовые проводимости различны, то НШР могут обеспечить полную компенсацию электромагнитной составляющей за счёт включения нейтрального реактора, сопротивление которого равно

$$Z_n = -\frac{Y_{pe} + Y_{0e}}{4Y_{0e} \cdot Y_{pe}} \quad (3.1)$$

Компенсация электростатической составляющей ВТД возможна лишь частично. Так, если исходить из усредненной межфазовой ёмкости

$$Y_{0m} = \frac{Y_{01} + Y_{02} + Y_{03}}{3}, \quad (3.2)$$

то сопротивление нейтрального реактора определится из следующего соотношения

$$Z_n = -\frac{Y_{0m}}{Y_{pe}(Y_{pe} + 4Y_{0m})} \quad (3.3)$$

3.1.2 Осуществление однофазного автоматического повторного включения в варианте с традиционной конструкцией фаз и полуфаз

Рассмотрим в первую очередь эффективность использования нейтрального реактора при авариях на фазах и полуфазах. При анализе режимов в паузу ОАПВ необходимо учитывать следующие ограничения. По условиям работы изоляции нейтрали отечественных НШР и УШР напряжение на ней не должно превосходит допустимого уровня 85 кВ. Второе ограничение связано с работой ОПН, установленных по концам линии. Как показано в [51], при длительности паузы ОАПВ порядка 1,0-1,5 сек напряжения в месте установки ОПН для линий класса 500 кВ не должно превосходить 230 кВ.

На рисунке 3.2 приведена зависимость ВН по концам аварийной фазы от сопротивления нейтрального реактора при аварии на фазе «0».

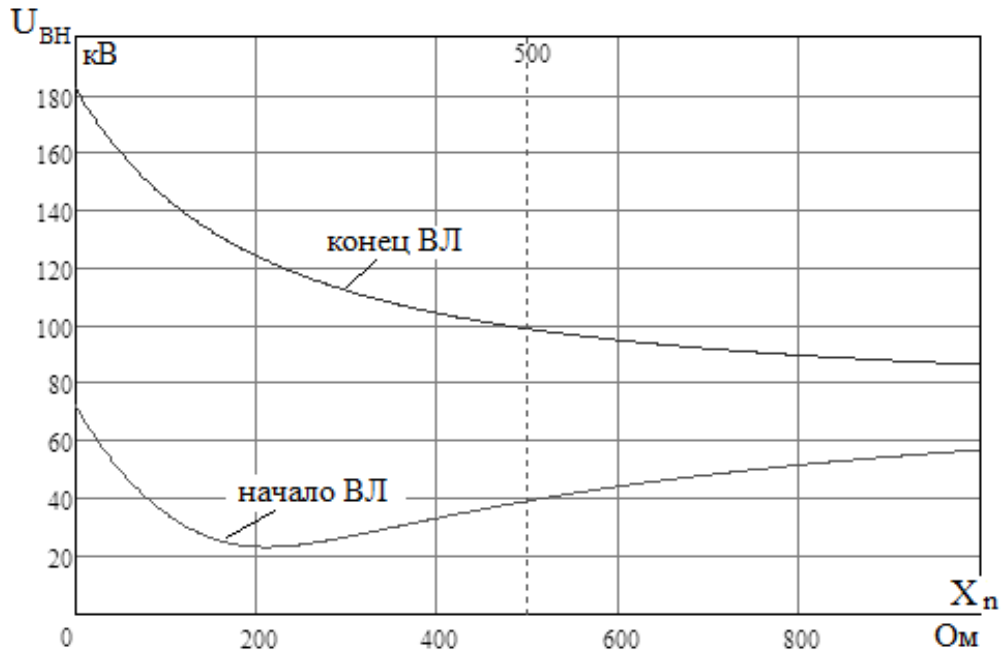


Рисунок 3.2 – Влияние сопротивления нейтрального реактора на уровень ВН по концам линии

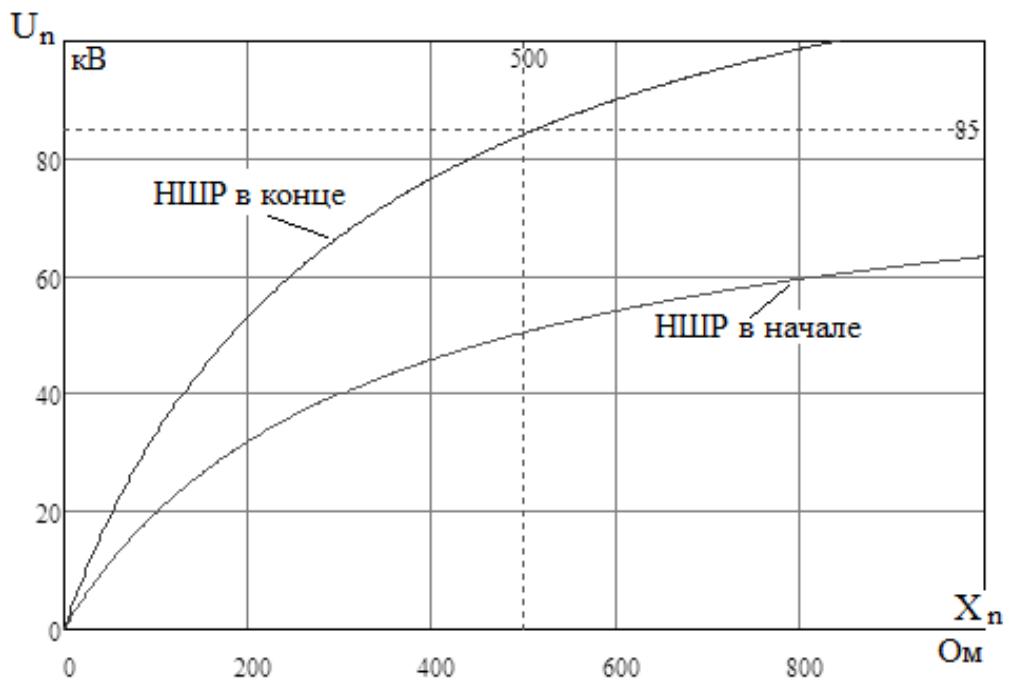


Рисунок 3.3 – Напряжение на нейтрали НШР в зависимости от сопротивления нейтрального реактора

Наибольшие ВН имеют место при авариях на приемном конце линии. При этом меньшим ВН соответствуют и меньшие ВТД. Однако, как видно из

рисунка 3.3, сопротивление нейтрального реактора ограничивается повышением напряжения на нейтрали, которое, как уже отмечалось, в паузу ОАПВ для отечественных ШР не должно превышать 85 кВ, и соответственно сопротивление нейтрального реактора при выполнении этого условия может быть принято равным 500 Ом.

Для определения ВТД был предложен графический метод [44], суть которого представлена ниже.

Описание графического метода

Воспользовавшись моделью дуги, приведенной в [37, 43], сопротивление дуги можно аппроксимировать следующим выражением

$$R_d(I_d) = \frac{A}{I_d^\alpha} \quad (3.4)$$

где $\alpha = 1,4$, $A \approx 1,3 \cdot 10^5$ для ВЛ 500 кВ и $A \approx 1,8 \cdot 10^5$ для ВЛ 750 кВ.

На рисунке 3.4 показаны зависимости сопротивления вторичной дуги от протекающего в ней тока для ВЛ 500 и 750 кВ.

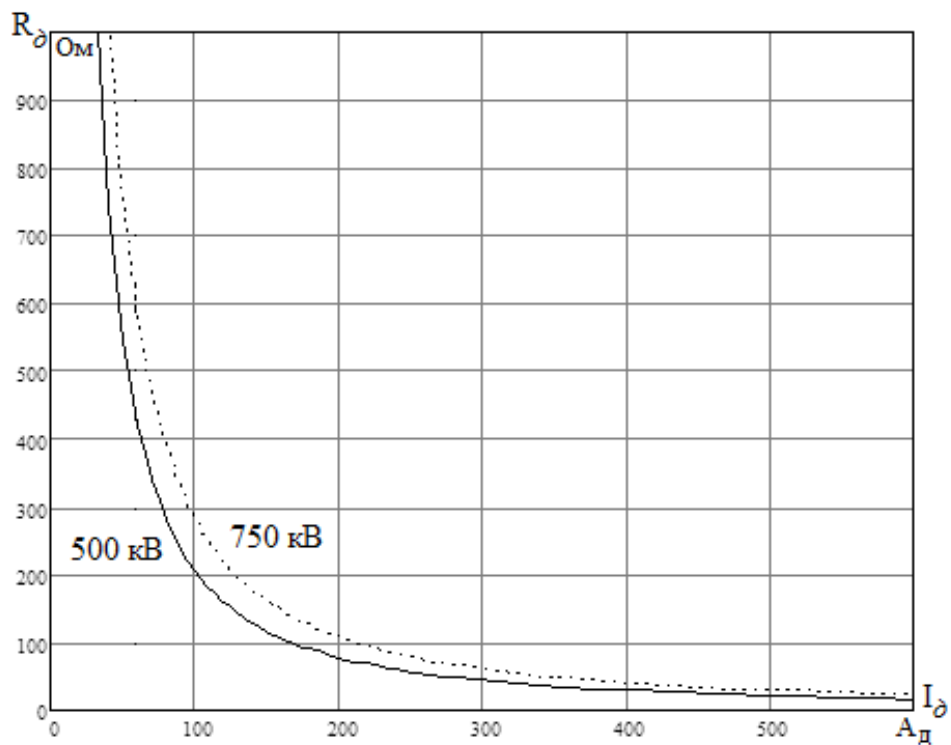


Рисунок 3.4 – Зависимость сопротивления вторичной дуги от её тока для ВЛ 500 и 750 кВ

Для определения ВТД на основании теоремы об эквивалентном источнике напряжения воспользуемся расчётной схемой, показанной на рисунке 3.5.

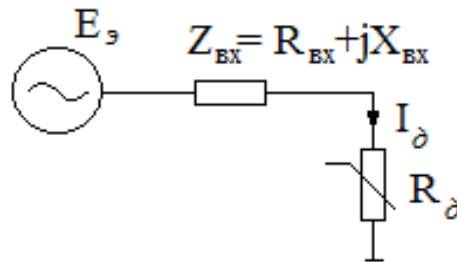


Рисунок 3.5 – Расчетная схема для определения ВТД

На этом рисунке введены следующие обозначения: $E_э = U_{вн}$ – ЭДС, равная напряжению, которое является ВН после погасания дуги; $Z_{вх} = R_{вх} + iX_{вх}$ – входное сопротивление пассивной электрической цепи при отсутствии дуги. Активной составляющей входного сопротивления можно пренебречь, и тогда имеем следующее уравнение эквивалентной схемы с дугой для определения вторичного тока дуги

$$U_{вн} = I_д \sqrt{X_{вх}^2 + \left(\frac{A}{I_д^\alpha}\right)^2}. \quad (3.5)$$

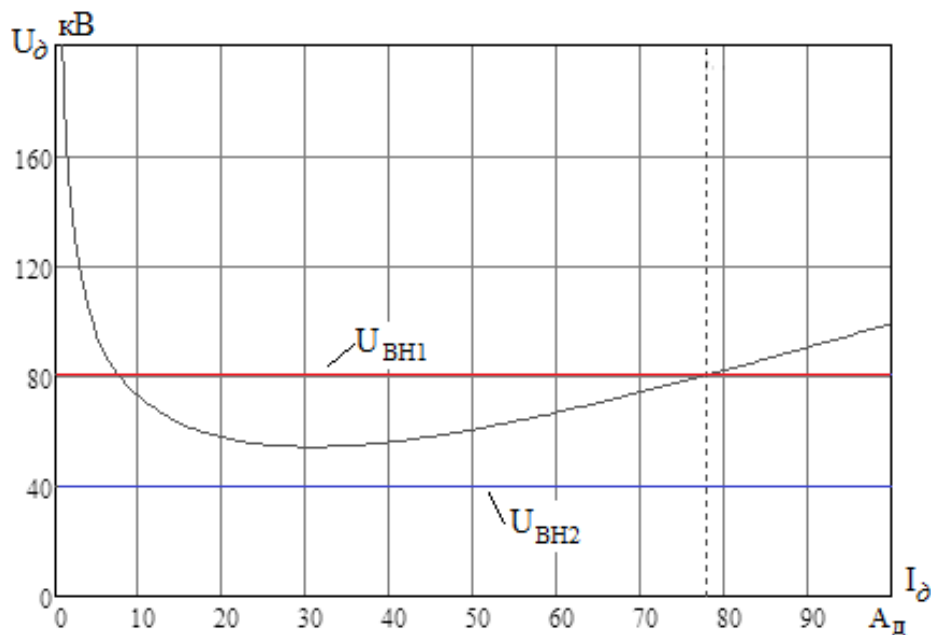


Рисунок 3.6 – Графическое решение уравнения эквивалентной схемы с дугой

На рисунке 3.6 показано графическое решение этого нелинейного уравнения. ВТД определяется в точке пересечения правой ветви кривой с величиной ВН ($U_{ВН1}$). Если ВН не пересекает кривую, определяемую уравнением (3.5), то это означает, что ВН недостаточно для поддержания устойчивого горения вторичной дуги ($U_{ВН2}$).

С использованием описанного выше метода на рисунке 3.7 дано определение ВТД при авариях в начале и конце линии.

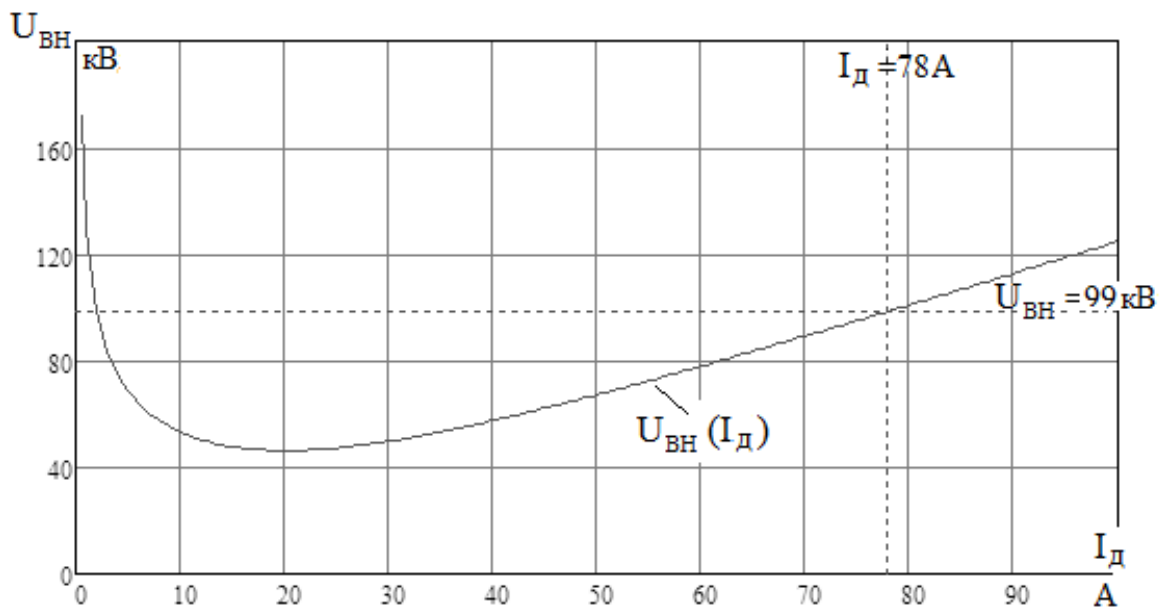
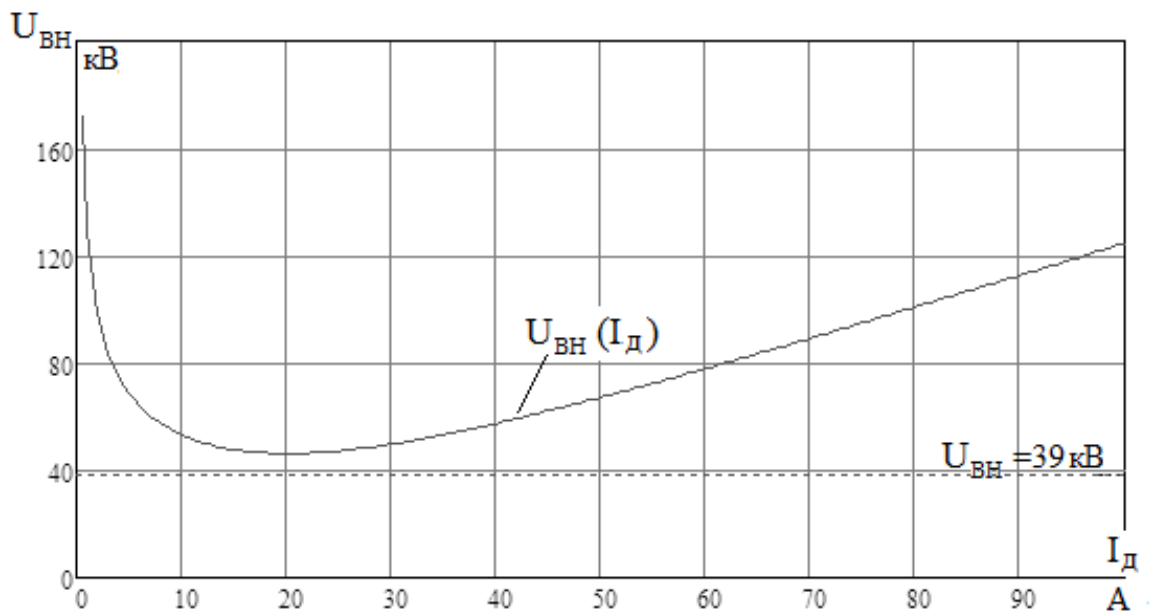


Рисунок 3.7 – Определение условий для гашения ВТД: авария на отправном конце линии (а); авария на приемном конце линии (б)

Как следует из приведённых кривых на рисунке 3.7, при авариях со стороны отправного конца линии, условия для гашения дуги выполняются и длительность паузы ОАПВ может быть принята минимальной - 0,5 сек, а что касается аварий на приёмном конце линии, то действующее значение ВТД составляет более 60 А и дуга имеет устойчивый характер, что требует переход на работу в трёхфазном режиме.

Основные данные при авариях на других фазах линии приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Условия гашения дуги на фазе Ф1 и полуфазах ПФ2 и ПФ3

Аварийная фаза	Место аварии на линии	X_n , Ом	ВН, кВ	ВТД, А	$t_{оапв}$, сек
Ф1	начало	450	105	> 60	Устойчивая дуга
	конец		42	–	0,5
ПФ2	начало	600	84	47	1,6
	конец		46	–	0,5
ПФ3	начало	600	34	–	0,5
	конец		92	51	1,8

Из приведённых выше расчётов можно заключить, что при авариях на полуфазах успешное ОАПВ может быть обеспечено, так как ограничения на длительность паузы ОАПВ в данном случае отсутствуют, а что касается аварий на фазах в начале линии, то дуга имеет устойчивый характер, что требует переход на работу в трёхфазном режиме.

Успешное ОАПВ при авариях на фазах можно обеспечить, если воспользоваться решением, предложенном в [52], суть которого состоит в том, что сопротивление аварийной фазы реактора на время паузы ОАПВ частично компенсируется путем включения в неё со стороны нейтрали емкостного сопротивления, как это показано на рисунке 3.8 применительно к аварии на фазе «0».

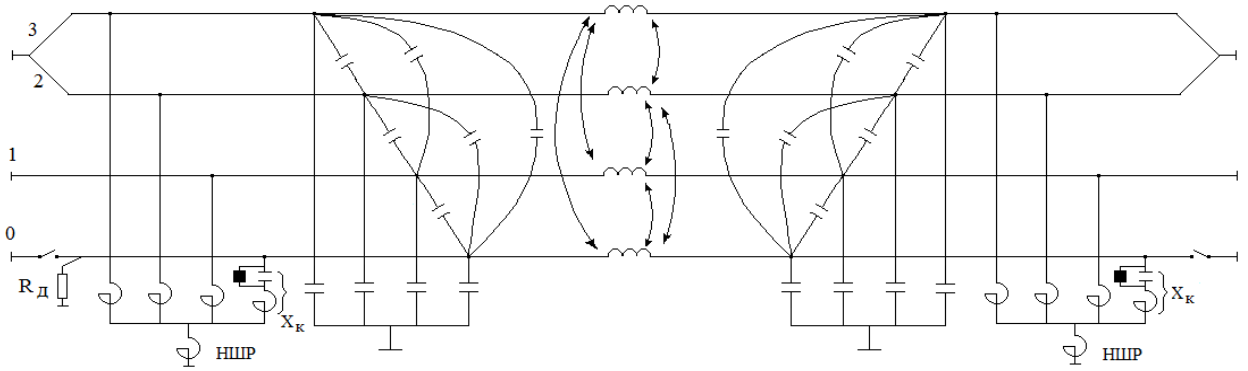


Рисунок 3.8 – Схема компенсации сопротивления реактора для аварийной фазы «0».

На рисунке 3.9 приведены кривые ВН в зависимости от величины скомпенсированного сопротивления для аварийной фазы НШР.

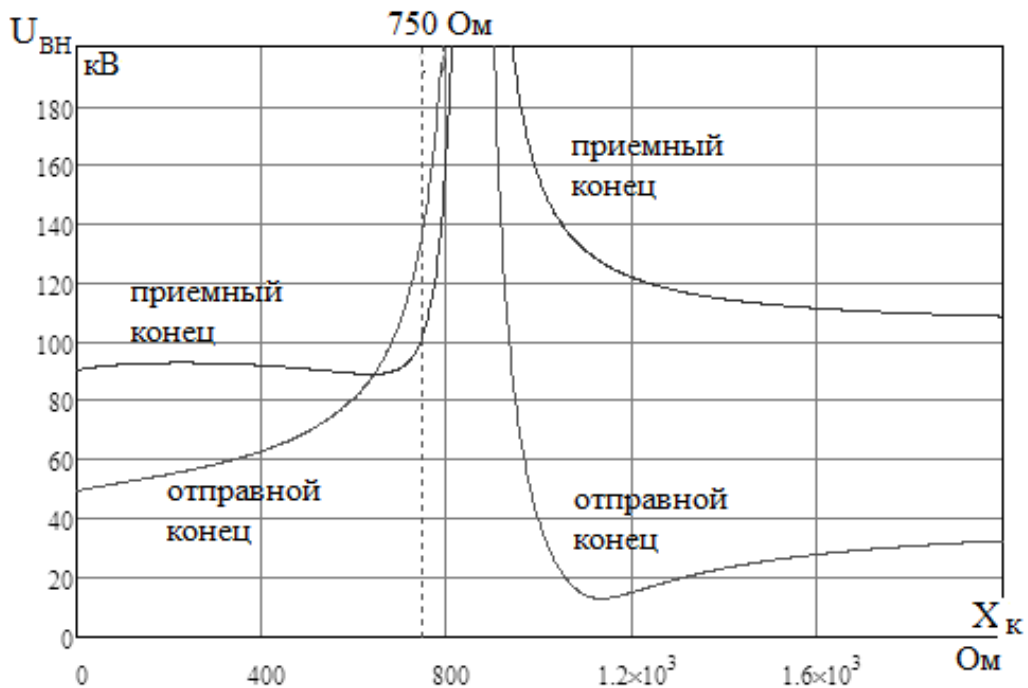
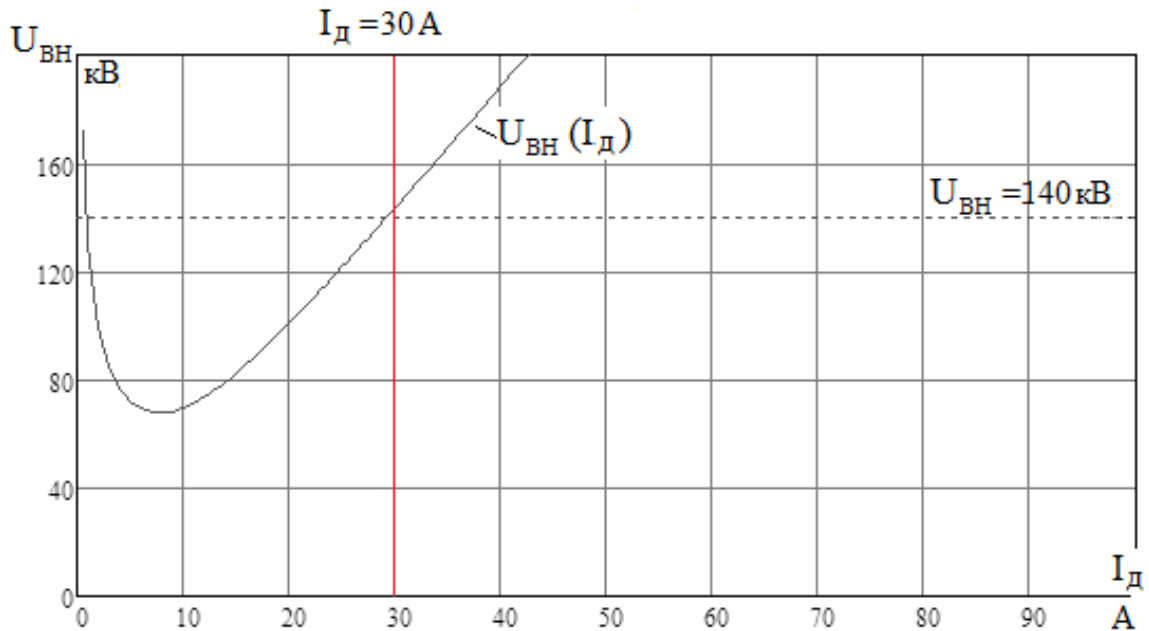


Рисунок 3.9 – Зависимость ВН от скомпенсированного сопротивления аварийной фазы

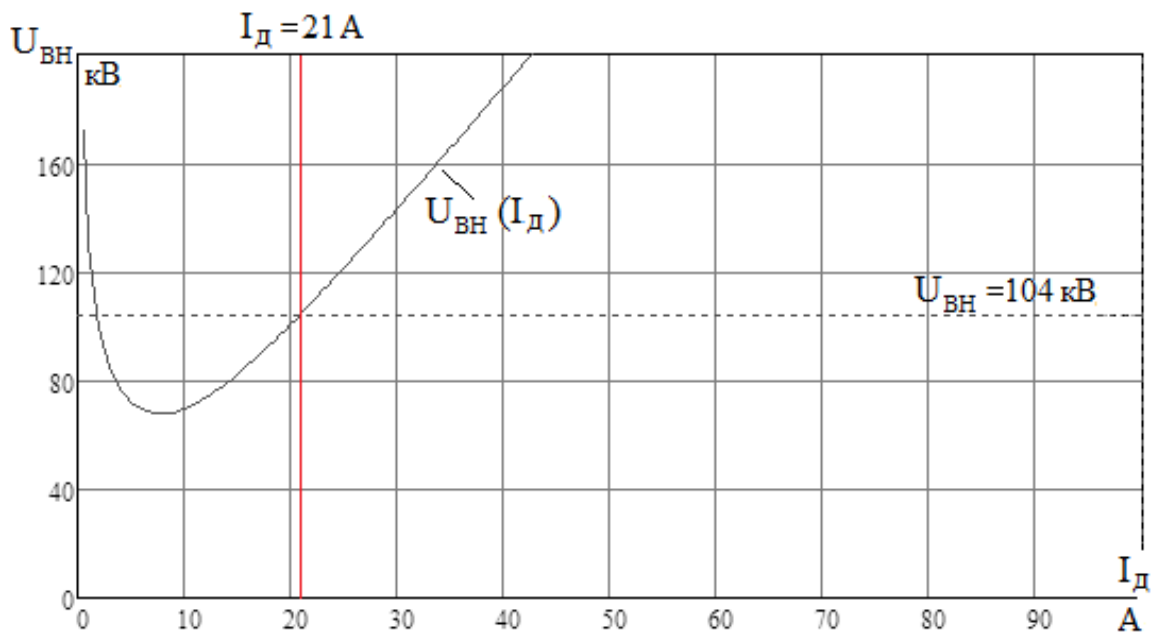
Скомпенсированное сопротивление может быть принято равным 750 Ом, что соответствует степени компенсации 50 %. При этом величина нейтрального

реактора составляла умеренную величину 300 Ом, при которой напряжение на нейтральных не превышает 65 кВ, что значительно меньше допустимого.

На рисунке 3.10 дано определение ВТД при авариях в начале и конце линии.



а)



б)

Рисунок 3.10 – Определение условий для гашения ВТД: а - авария на отправном конце линии; б - авария на приемном конце линии

Как видно из рисунка 3.10, ВТД имеют значения, при которых обеспечивается успешное ОАПВ при длительности паузы в пределах 1,0 сек.

Основные данные при авариях на других фазах линии приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Условия гашения дуги на фазе Ф1 и полуфазах ПФ2, ПФ3

Аварийная фаза	Место аварии на линии	X_n , Ом	ВН, кВ	ВТД, А	$t_{оапв}$, сек
Ф1	начало	750	69	8	0,52
	конец		133	28	0,85
ПФ2	начало	800	86	27	0,84
	конец		123	40	1,3
ПФ3	начало	800	132	43	1,43
	конец		76	22	0,71

Из приведённых выше результатов расчётов можно заключить, что при авариях как на фазах, так и полуфазах может быть обеспечено успешное ОАПВ при длительности паузы не более 1,5 сек.

3.1.3 Осуществление однофазного автоматического повторного включения в варианте с расширенной конструкцией фаз и полуфаз

Начнём, как и выше, рассмотрение эффективности использования нейтрального реактора при авариях на фазах и полуфазах. На рисунке 3.11 приведена зависимость ВН от сопротивления нейтрального реактора при аварии на фазе «0».

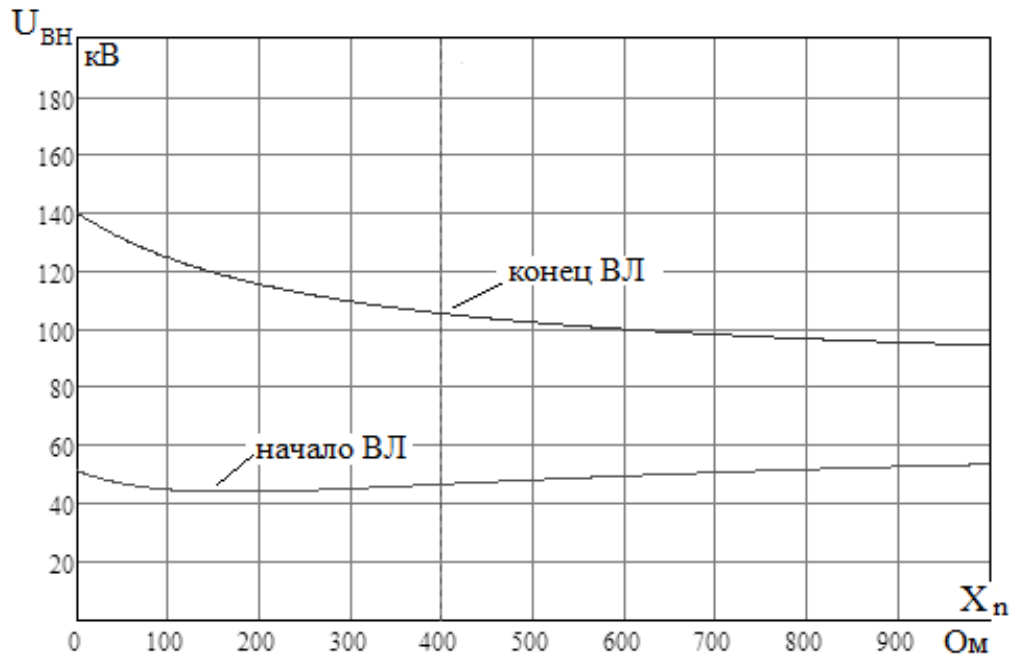


Рисунок 3.11 – Влияние сопротивления нейтрального реактора на уровень ВН по концам линии

Наибольшие ВН имеют место при авариях на приемном конце линии. При этом меньшим ВН соответствуют и меньшие ВТД. Однако как видно из рисунка 3.12, сопротивление нейтрального реактора ограничивается повышением напряжения на нейтрали, которое в паузу ОАПВ не должно превышать 85 кВ, и соответственно сопротивление нейтрального может быть принято равным 400 Ом.

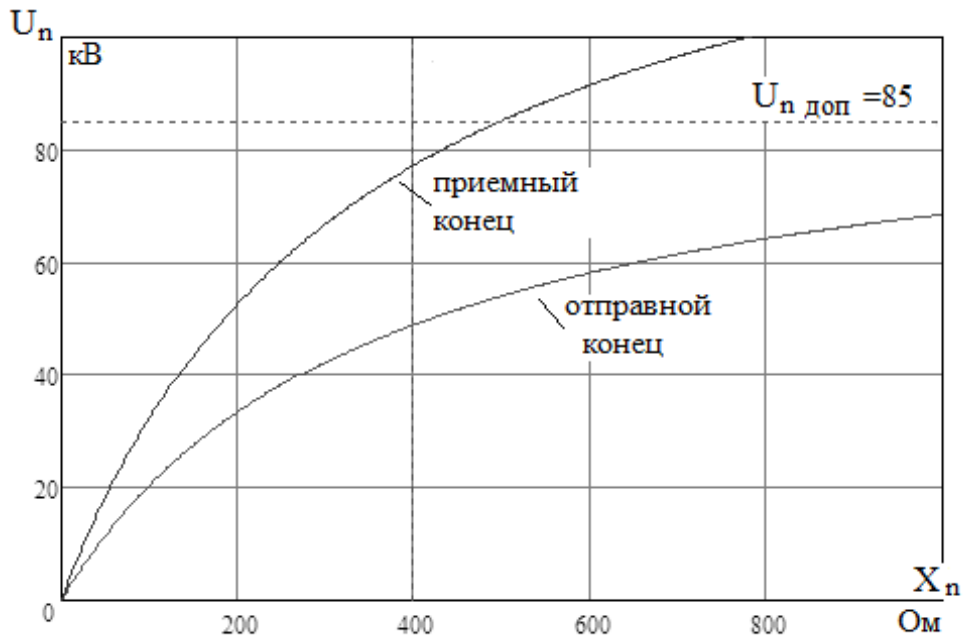
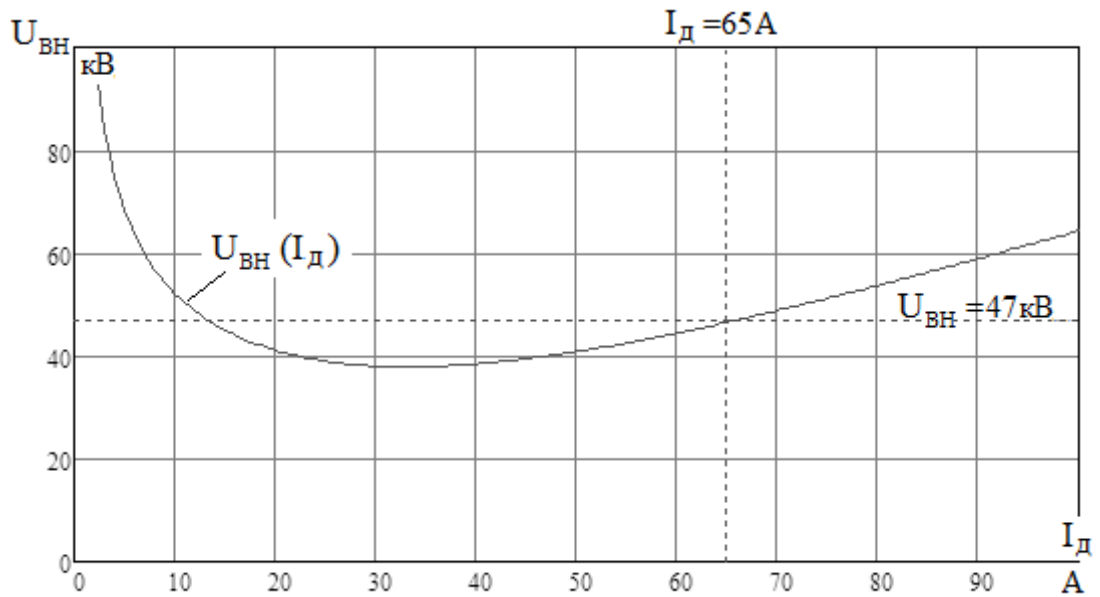


Рисунок 3.12 – Напряжение на нейтрали НШР в зависимости от сопротивления нейтрального реактора

С использованием методики [44] на рисунок 3.13 дано определение ВТД при авариях в начале и конце линии.



а)

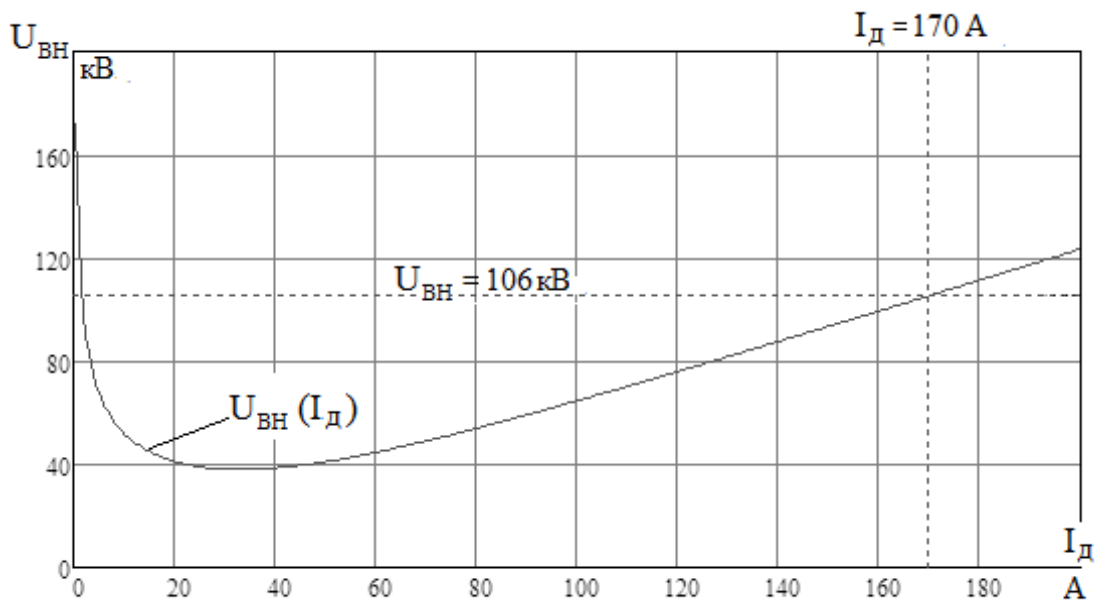


Рисунок 3.13 – Определение условий для гашения ВТД: авария на отправном конце линии (а); авария на приемном конце линии (б)

Как следует из приведённых кривых на рисунок 3.13, при авариях со стороны отправного и приёмного концов линии действующее значение ВТД превышает

60 кВ, что говорит об устойчивом характере дуги. Данные при авариях на других элементах линии приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Условия гашения дуги на фазе Ф1 и полуфазах ПФ2, ПФ3

Аварийная фаза	Место аварии на линии	X_n , Ом	V_H , кВ	$V_{ТД}$, А	$t_{оапв}$, сек
Ф1	начало	400	111	> 60	Устойчивая дуга
	конец		80	> 60	Устойчивая дуга
ПФ2	начало	500	86	> 60	Устойчивая дуга
	конец		68	52	1,9
ПФ3	начало	500	46	21	0,7
	конец		95	> 60	Устойчивая дуга

Из приведённых выше результатов расчётов можно заключить, что при авариях на фазах и полуфазах возникает в паузу ОАПВ устойчивая дуга, что требует перехода на трёхфазный режим работы.

Успешное ОАПВ для данного варианта можно обеспечить, если воспользоваться решением, предложенном в [52], о котором упоминалось выше (Рисунок 3.8).

На рисунок 3.14 приведены кривые V_H в зависимости от величины скомпенсированного сопротивления для аварийной фазы НШР.

Скомпенсированное сопротивление может быть принято равным 450 Ом, что соответствует степени компенсации 30 %. При этом величина нейтрального реактора составляла умеренную величину 300 Ом, при которой напряжение на нейтральных не превышает 65 кВ, что значительно меньше допустимого.

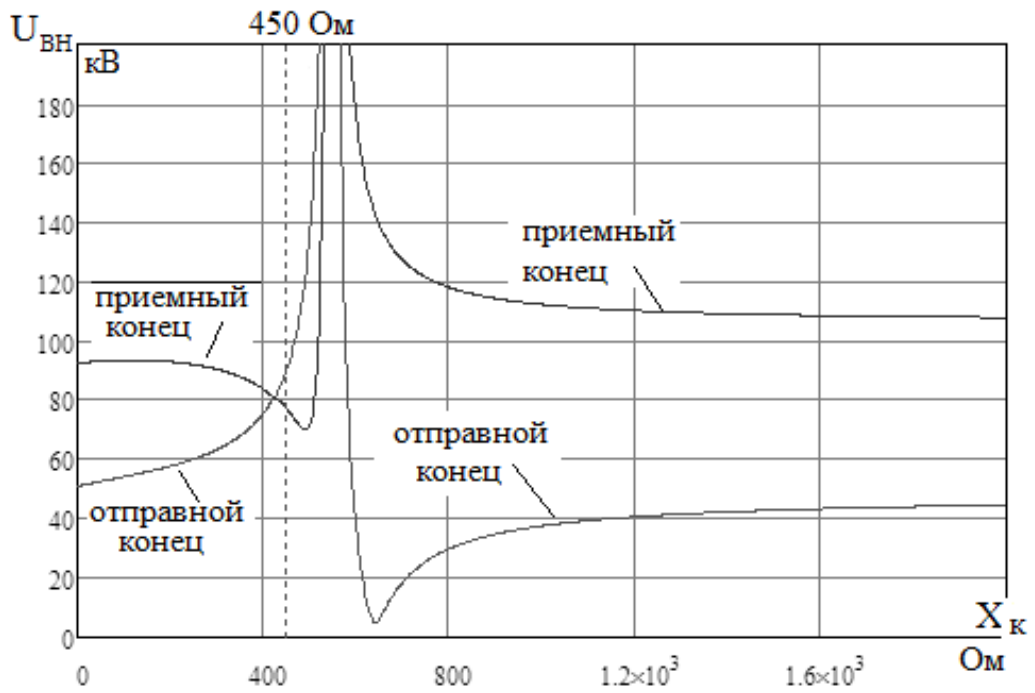
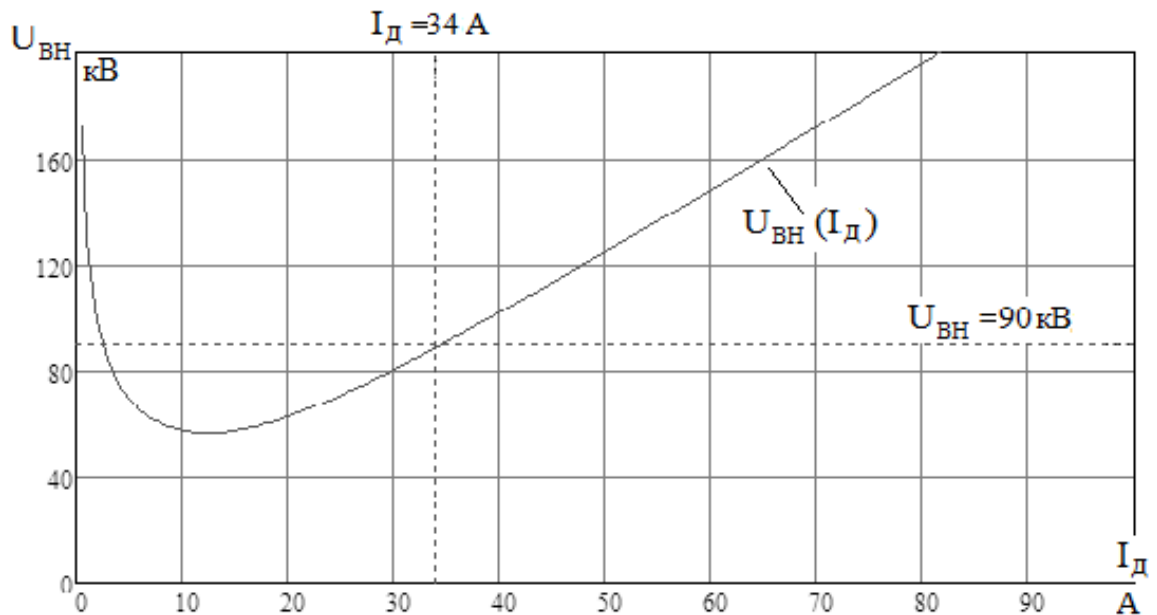
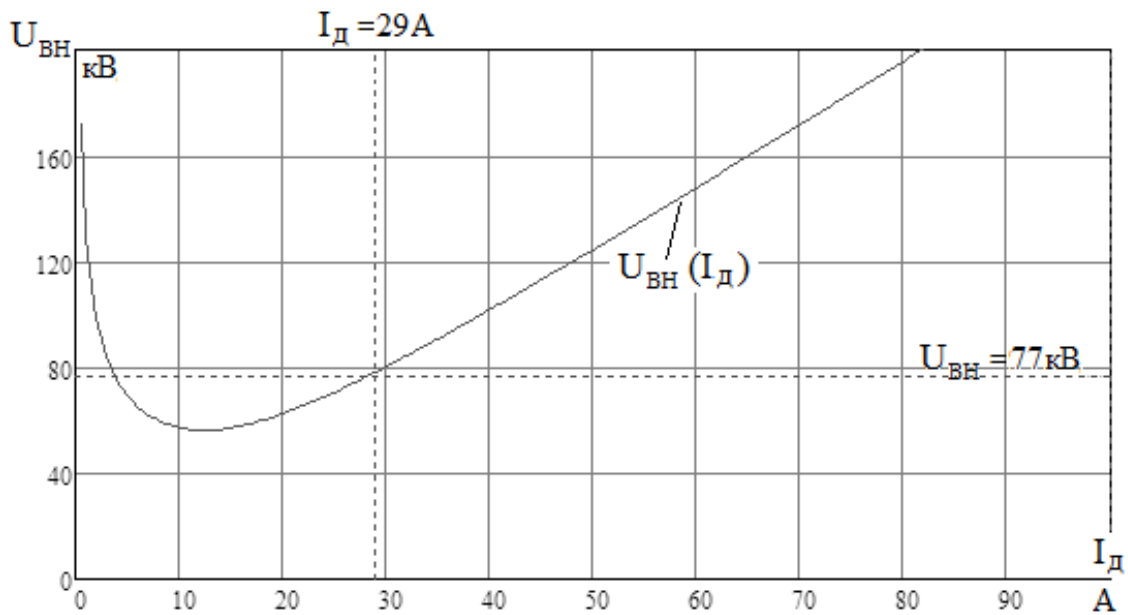


Рисунок 3.14 – Зависимость ВН от скомпенсированного сопротивления аварийной фазы

На рисунке 3.15 дано определение ВТД при авариях в начале и конце линии.



а)



б)

Рисунок 3.15 – Определение условий для гашения ВТД: авария на отправном конце линии (а); авария на приемном конце линии (а)

Как видно из рисунка 3.15, ВТД имеют значения, при которых обеспечивается успешное ОАПВ при длительности паузы порядка 1,0 сек.

Основные данные при авариях на других элементах линии приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Условия гашения дуги на фазе Ф1 и полуфазах ПФ2, ПФ3

Аварийная фаза	Место аварии на линии	X_n , Ом	ВН, кВ	ВТД, А	$t_{оапв}$, сек
Ф1	начало	450	65	22	0,7
	конец		92	36	1,14
ПФ2	начало	400	41	35	1,1
	конец		54	> 60	Устойчивая дуга
ПФ3	начало	500	62	> 60	Устойчивая дуга
	конец		20	–	0,5

Из приведённых выше результатов расчётов можно заключить, что при авариях на фазах обеспечивается успешное ОАПВ с длительностью паузы не более 1,2 сек, а при авариях на полуфазах имеет место устойчивая дуга, что требует переход на трёхфазный режим работы.

3.2 Осуществление однофазного автоматического повторного включения в схемах с управляемыми шунтирующими реакторами

3.2.1 П-образная схема замещения четырёхпроводной трёхфазной линии и пути компенсации вторичного тока дуги

УШР позволяют иметь пофазно различные регулируемые параметры. На рисунке 3.16 показана схема замещения ЧТЛ для расчётов установившихся ВН и ВТД в схемах с УШР для определённости при дуговом замыкании в начале фазы «0».

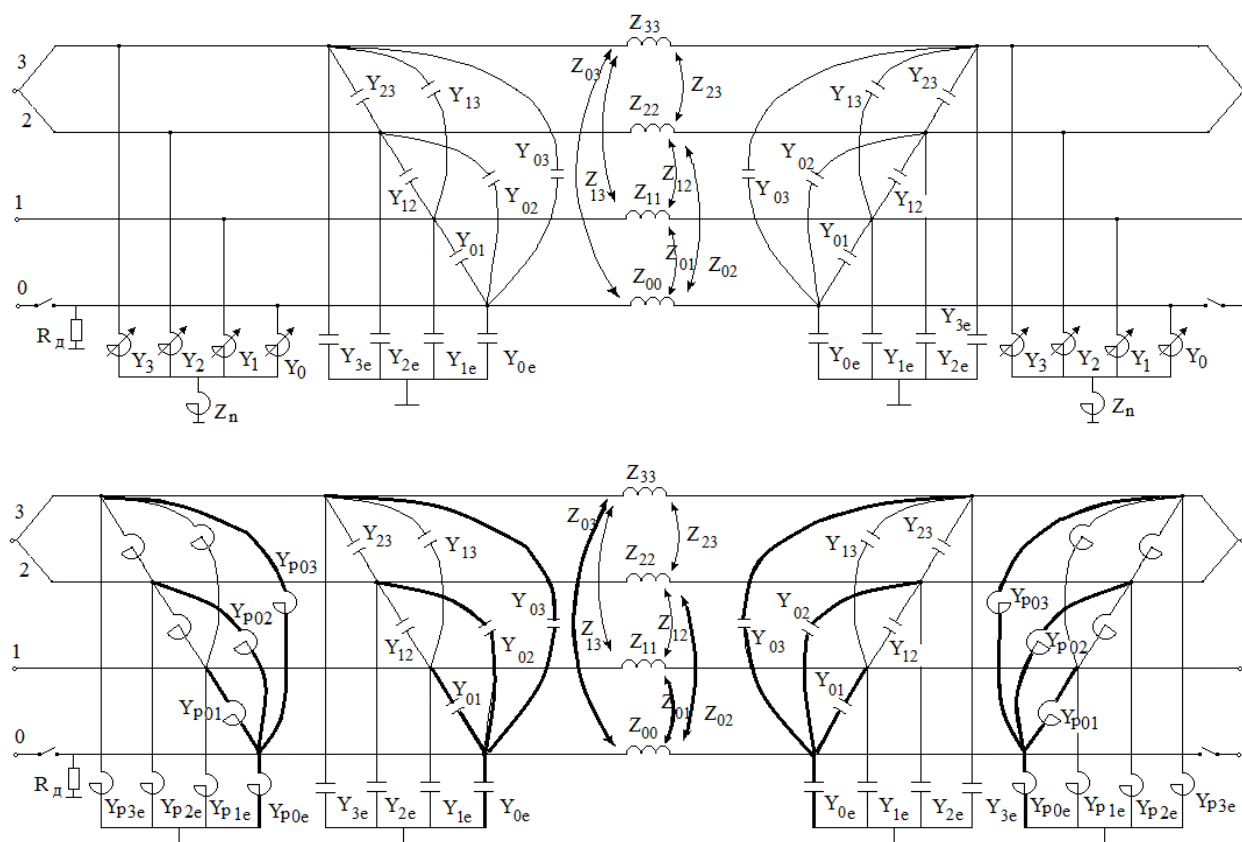


Рисунок 3.16 – Схема замещения ЧТЛ с учётом УШР при ОАПВ в фазе «0»: исходная схема (а); преобразованная схема (б)

После преобразования пятилучевой звезды шунтирующих реакторов в эквивалентный многоугольник [53] схема принимает вид, показанный на рисунке 3.16 б.

При этом имеют место следующие соотношения между элементами звезды и многоугольника УШР

$$Y_{p01} = \frac{Y_0 Y_1}{Y_\Sigma}, \quad Y_{p02} = \frac{Y_0 Y_2}{Y_\Sigma}, \quad Y_{p03} = \frac{Y_0 Y_3}{Y_\Sigma}, \quad Y_{p0e} = \frac{Y_0 Y_n}{Y_\Sigma} \quad (3.6)$$

где $Y_\Sigma = Y_0 + Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_n$.

При полной компенсации электростатической составляющей ВТД и частичной компенсации электромагнитной составляющей ВТД параметры УШР должны удовлетворять условию

$$Y_{p01} = -Y_{01}, \quad Y_{p02} = -Y_{02}, \quad Y_{p03} = -Y_{03}, \quad Y_{p0e}(\alpha) = -\alpha Y_{0e}, \quad (3.7)$$

где $Y_{01}, Y_{02}, Y_{03}, Y_{0e}$ – емкостные элементы линии, показанные на рисунке 3.16а, α – степень компенсации емкости ВЛ на землю за счет УШР.

Из (3.6) вытекают соотношения

$$K_1 = \frac{Y_{p01}}{Y_{p0e}} = \frac{Y_1}{Y_n}, \quad K_2 = \frac{Y_{02}}{Y_{0e}} = \frac{Y_2}{Y_n}, \quad K_3 = \frac{Y_{03}}{Y_{0e}} = \frac{Y_3}{Y_n} \quad (3.8)$$

для определения исходных параметров УШР

$$Y_1 = K_1 Y_n, \quad Y_2 = K_2 Y_n, \quad Y_3 = K_3 Y_n, \\ Y_0 = \frac{Y_{01}(Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_n)}{Y_1 - Y_{01}}. \quad (3.9)$$

Коэффициенты, входящие в (3.9), с учётом (3.7) определяются как

$$K_1 = \frac{Y_{01}}{\alpha Y_{0e}}, \quad K_2 = \frac{Y_{02}}{\alpha Y_{0e}}, \quad K_3 = \frac{Y_{03}}{\alpha Y_{0e}} \quad (3.10)$$

Таким образом, компенсация электромагнитной и электростатической составляющих ВТД может быть обеспечена при любой величине нейтрального реактора.

На рисунке 3.17 показаны пофазные проводимости УШР, обеспечивающие полную компенсацию электромагнитной и электростатической составляющих ВТД, в зависимости от величины нейтрального реактора.

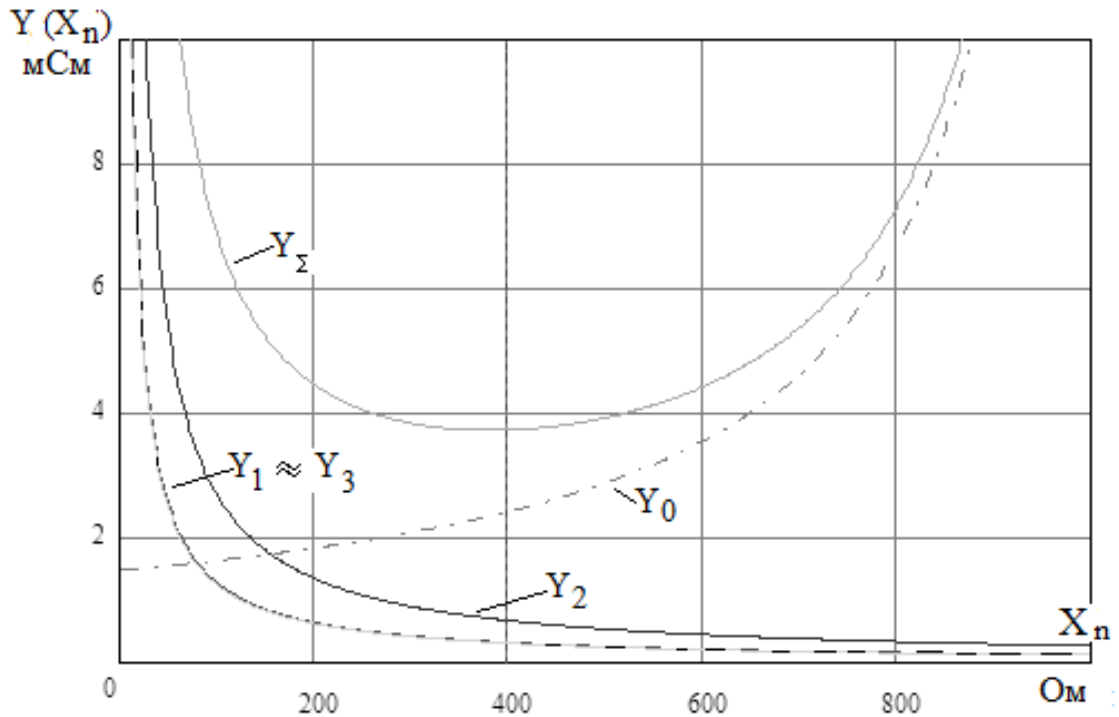


Рисунок 3.17 – Пофазные проводимости УШР в зависимости от величины нейтрального реактора

Суммарная проводимость оказывается минимальной при изменении сопротивления нейтрального реактора в диапазоне 200 - 600 Ом. Подобным путём определяются выражения для определения пофазных параметров УШР для осуществления ОАПВ при авариях на Ф1 и на ПФ2 и ПФ3.

3.2.2 Осуществление однофазного автоматического повторного включения в варианте с традиционной конструкцией фаз и полуфаз

Как показал анализ, ВН практически не зависят от сопротивления нейтрального реактора, которое в дальнейшем принимается равным 500 Ом. Однако при точной компенсации, когда $\alpha = 1$, ВН превышают допустимую величину 230 кВ при возможном отклонении углов δ (Рисунок 3.18).

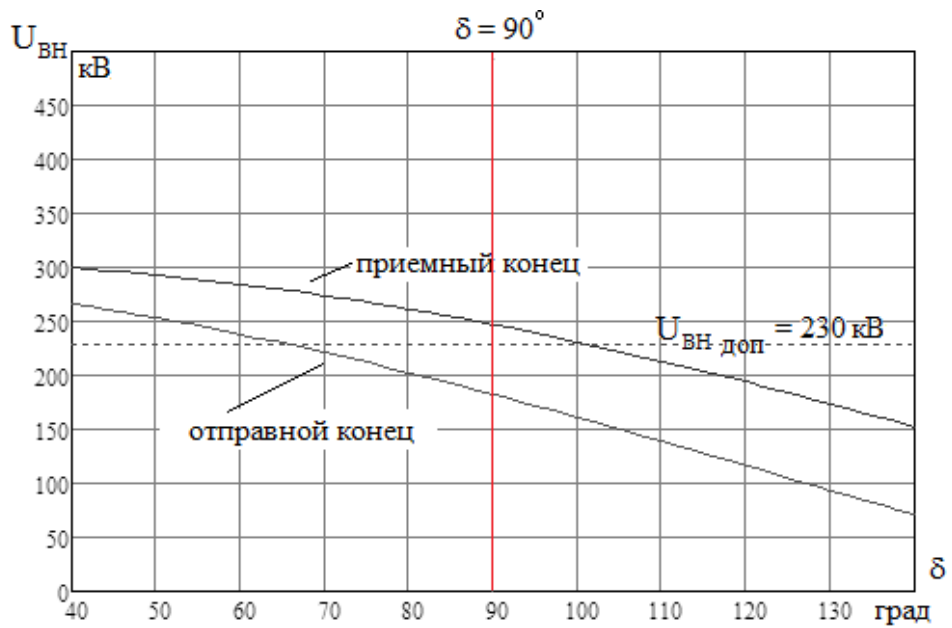


Рисунок 3.18 – Зависимость ВН от угла отклонения ($\alpha = 1,0$)

Допустимая величина ВН обеспечивается при частичной компенсации электромагнитной составляющей ВТД, когда $\alpha < 0,95$, как это демонстрируется на рисунке 3.19 при $\alpha = 0,90$.

Пофазные параметры УШР, соответствующие $\alpha = 0,90$, приведены в таблице 3.5.

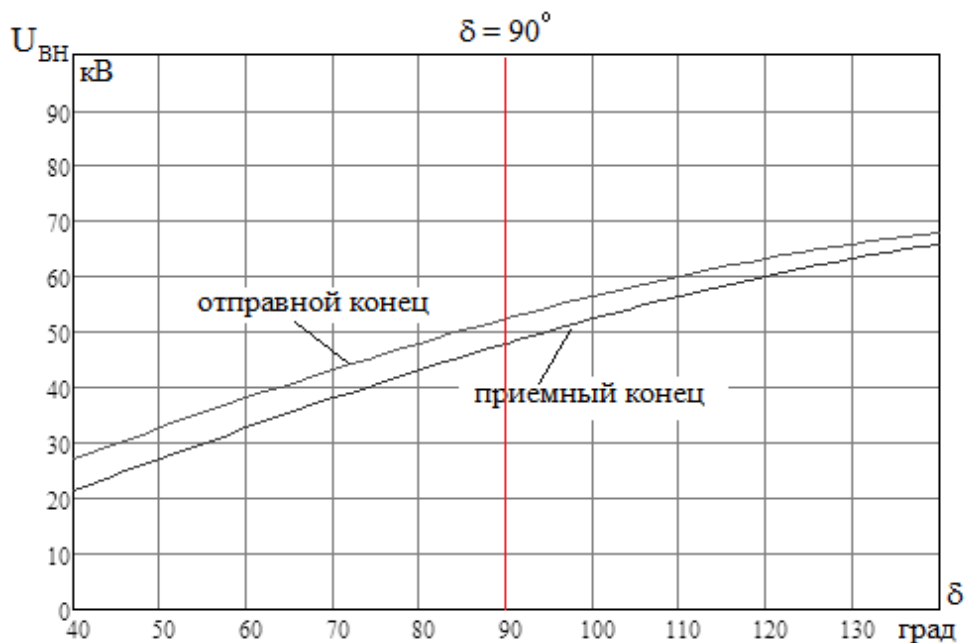


Рисунок 3.19 – Зависимость ВН от угла отклонения ($\alpha = 0,90$)

Таблица 3.5 – Пофазные параметры УШР (ОАПВ на Φ_0)

Y_0 , мСм	Y_1 , мСм	Y_2 , мСм	Y_3 , мСм
1,26	0,26	0,55	0,26

Напряжение на нейтрали УШР в данном случае также не превышает допустимую величину 85 кВ, составляя не более 60 кВ.

С использованием методики [44] на рисунке 3.20 дано определение ВТД при авариях в начале и конце линии.

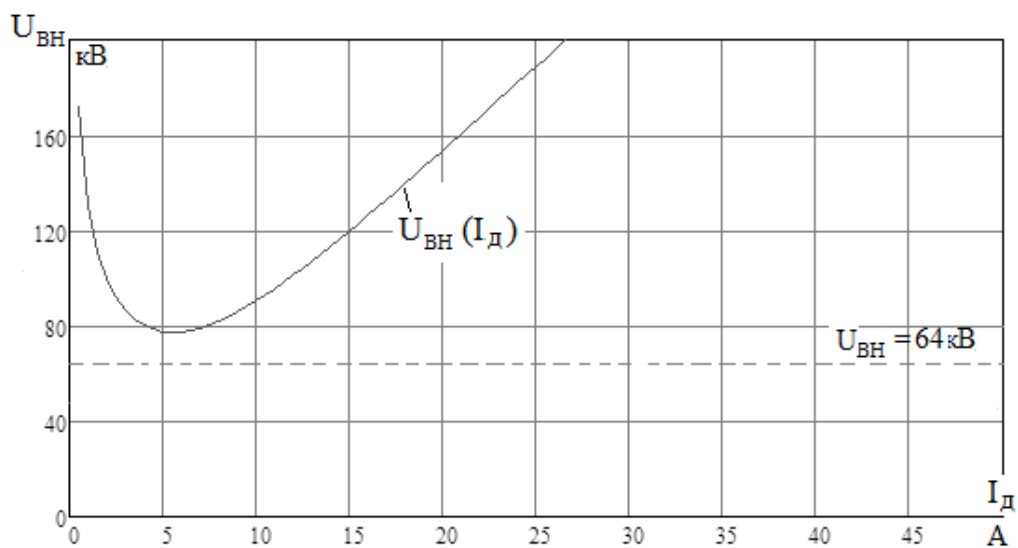
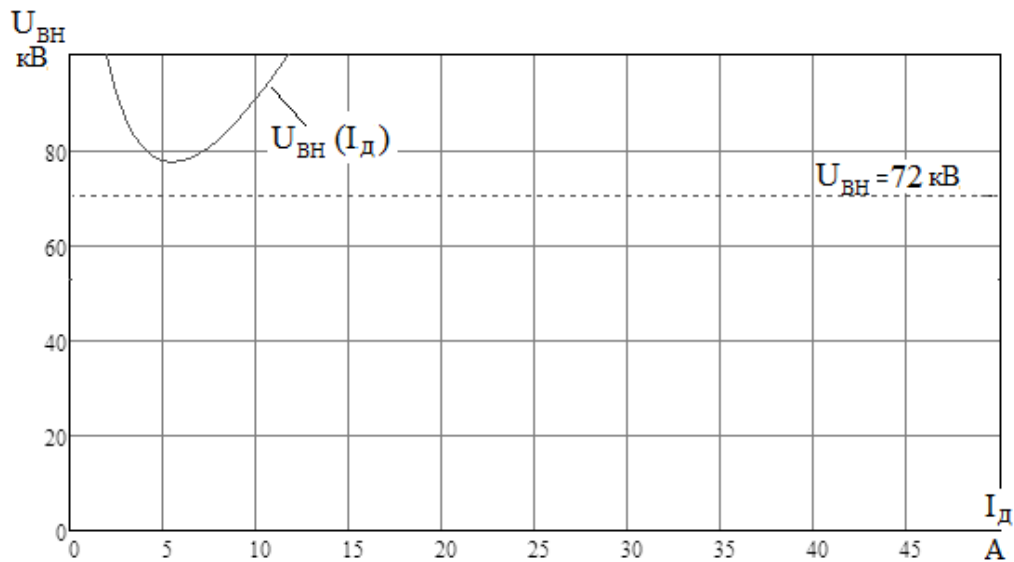


Рисунок 3.20 – Определение условий для гашения ВТД (ОАПВ на Φ_0): авария на отправном конце линии (а); авария на приемном конце линии (б)

Как следует из приведённых кривых на рисунок 3.20, при авариях со стороны обоих концов линии, условия для гашения дуги выполняются и длительность паузы ОАПВ может быть принята минимальной - 0,5 сек.

Основные результаты осуществления ОАПВ на других элементах линии (Ф1, ПФ2, ПФ3) сводятся к следующему. Пофазные параметры УШР, соответствующие $\alpha = 0,90$, приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Пофазные параметры УШР (ОАПВ на Ф1, ПФ2, ПФ3)

Аварийная фаза	Y_0 , мСм	Y_1 , мСм	Y_2 , мСм	Y_3 , мСм
Ф1	0,26	1,26	0,26	0,55
ПФ2	0,77	0,36	1,0	0,71
ПФ3	0,36	0,77	0,71	1,0

Как показывают проведённые расчеты при указанных в таблице 3.6 параметрах, соответствующие ВН находятся в допустимых пределах, не превышая 72 кВ, а условия для гашения дуги выполняются во всех случаях, и таким образом длительность паузы ОАПВ может быть принята минимальной величиной - 0,5 сек.

3.2.3 Осуществление однофазного автоматического повторного включения в варианте с расширенной конструкцией фаз и полуфаз

Как и при осуществлении ОАПВ в варианте I в случае полной компенсации электростатической и электромагнитной составляющих ВДТ, ВН по концам линии превосходят допустимый уровень 230 кВ. Приемлемый уровень ВН обеспечивается лишь при частичной компенсации электромагнитной составляющей ВДТ. В таблице 3.7 приведены пофазные параметры УШР при степени компенсации электромагнитной составляющей ВДТ, равной $\alpha = 0,90$.

Таблица 3.7 – Пофазные параметры УШР (ОАПВ на Ф0, Ф1, ПФ2, ПФ3)

Аварийная фаза	Y_0 , мСм	Y_1 , мСм	Y_2 , мСм	Y_3 , мСм
Ф0	2,07	0,37	0,64	0,27
Ф1	0,37	2,07	0,27	0,64
ПФ2	1,26	0,53	1,15	0,88
ПФ3	0,53	1,26	0,88	1,15

При параметрах, указанных в таблице 3.7, соответствующие ВН находятся в допустимых пределах, не превышая 55 кВ, а условия для гашения дуги в паузу ОАПВ выполняются во всех случаях, и таким образом длительность паузы ОАПВ может быть принята минимальной, равной 0,5 сек.

3.3 Осуществление однофазного автоматического повторного включения в четырёхпроводных трёхфазных линиях при использовании автоматического шунтирования фазы

3.3.1 Общие положения

Как показал предыдущий анализ, ОАПВ с использованием неуправляемыми шунтирующими реакторами не даёт значительный эффект при ликвидации неустойчивых ОКЗ, так как время бестоковой паузы в ряде случаев превышает 1,0 сек. Для создания оптимальных условий при ликвидации неустойчивого ОКЗ, НШР должны оснащаться батареей конденсаторов, установленной со стороны нейтральных выводов реакторов и шунтированной в нормальном режиме выключателем.

Кроме того, ОАПВ с использованием НШР имеет ряд следующих недостатков:

- в режиме ОАПВ из-за отсутствия определенного количества ШР возможно появления резонансных повышений напряжения;

- невозможность осуществления ОАПВ в случае отказа одной из фазных выключателей при коммутации реакторных выключателей;
- снижение пропускной способности электропередачи по причине снижения напряжения на шинах при подключении НШР.

Перечисленные недостатки устраняются с использованием способа автоматического шунтирования аварийной фазы (АШФ) [54,55].

Схема для осуществления АШФ приведена на рисунке 3.21. С помощью данного способа создаются благоприятные условия для гашения вторичной дуги.

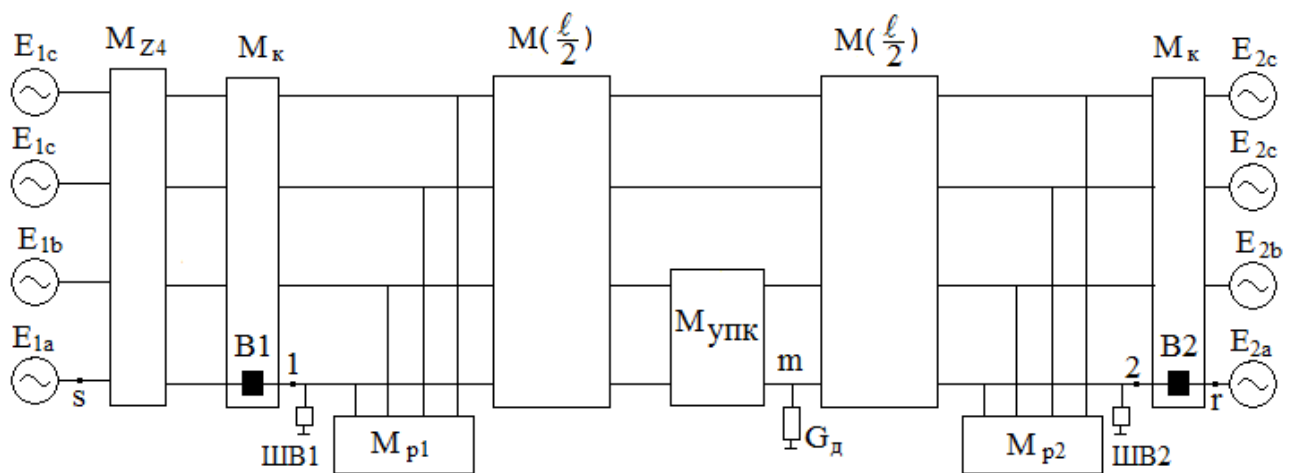


Рисунок 3.21 – Схема осуществления ОАПВ с АШФ

3.3.2 Алгоритм для расчета восстанавливающихся напряжений и вторичных токов дуги

Согласно рисунку 3.21 алгоритм для определения ВТД включает следующие этапы. На первом этапе определяется полная фазная матрица всей схемы согласно (3.11), а затем полная фазная матрица участка m-r (3.12)

$$\mathbf{M}_{Sr} = \mathbf{M}_{Z4} \cdot \mathbf{M}_K \cdot \mathbf{M}_{ушк} \cdot \mathbf{M}_{p1} \cdot \mathbf{M}(\frac{\ell}{2}) \cdot \mathbf{M}_{ушк} \cdot \mathbf{M}_o \mathbf{M}(\frac{\ell}{2}) \cdot \mathbf{M}_{p2} \cdot \mathbf{M}_{ушк} \cdot \mathbf{M}_K \quad (3.11)$$

$$\mathbf{M}_{mr} = \mathbf{M}(\frac{\ell}{2}) \cdot \mathbf{M}_{p2} \cdot \mathbf{M}_{ушк} \cdot \mathbf{M}_K \quad (3.12)$$

Далее определяются соответствующие подматрицы этих полных матриц

$$\begin{aligned}
\mathbf{A}_{sr} &= \text{submatrix}(\mathbf{M}_{sr}, 0, 3, 0, 3), \\
\mathbf{B}_{sr} &= \text{submatrix}(\mathbf{M}_{sr}, 0, 3, 4, 7), \\
\mathbf{A}_{mr} &= \text{submatrix}(\mathbf{M}_{mr}, 0, 3, 0, 3), \\
\mathbf{B}_{mr} &= \text{submatrix}(\mathbf{M}_{mr}, 0, 3, 4, 7).
\end{aligned} \tag{3.13}$$

На втором этапе определяется вектор-столбец фазных токов в конце схемы

$$\mathbf{I}_{r\phi} = \mathbf{B}_{sr}^{-1}(\mathbf{E}_{1\phi} - \mathbf{A}_{sr}\mathbf{E}_{2\phi}) \tag{3.14}$$

и вектор-столбец фазных напряжений в месте горения дуги

$$\mathbf{U}_{1\phi}(R_{\partial}) = \mathbf{A}_{1r}\mathbf{E}_{2\phi} + \mathbf{B}_{1r}\mathbf{I}_{r\phi}(R_{\partial}) \tag{3.15}$$

где $\mathbf{E}_1 = E_{1\phi} e^{i\delta} \begin{vmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \\ a \end{vmatrix}$, $\mathbf{E}_{2\phi} = \frac{500}{\sqrt{3}} \begin{vmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \\ a \end{vmatrix}$ – вектор - столбцы заданных ЭДС по концам

линии, $E_{1\phi}$ - модуль фазной ЭДС на отправном конце, δ -угловой сдвиг между концевыми ЭДС.

Затем определяется напряжение в месте горения вторичной дуги

$$U_{\partial}(R_{\partial}) = U_{1\phi}(R_{\partial})_0 \tag{3.16}$$

и ВТД

$$I_{\partial}(R_{\partial}) = \frac{U_{\partial}(R_{\partial})}{R_{\partial}} \tag{3.17}$$

Как было показано в [44], после определения ВН

$$U_{вн} = U_{\partial}(R_{\partial} = 10^6) \tag{3.18}$$

и входного сопротивления относительно места дуги

$$X_{вх} = j\omega \frac{U_{вн}}{I_{кз}(R_{д} = 1 \text{ Ом})} \tag{3.19}$$

где

$$I_{кз}(R_{д} = 1 \text{ Ом}) = \frac{U_{д}(R_{д} = 1)}{R_{д} = 1} \tag{3.20}$$

находится ток в месте дуги графическим путём.

Алгоритм для определения ВН по концам линии, где установлены ОПН, после расшунтирования состоит из следующих этапов.

На первом этапе определяется полная фазная матрица всей схемы согласно (3.21), а затем полная фазная матрица участка m-r (3.22)

$$\mathbf{M}_{sr} = \mathbf{M}Z4 \cdot \mathbf{M}_\kappa \cdot \mathbf{M}_{p1} \cdot \mathbf{M}(\ell/2) \cdot \mathbf{M}_{ynk} \cdot \mathbf{M}(\ell/2) \cdot \mathbf{M}_{p2} \cdot \mathbf{M}_\kappa \quad (3.21)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_{1r} &= \mathbf{M}(\ell/2) \cdot \mathbf{M}_{ynk} \cdot \mathbf{M}(\ell/2) \cdot \mathbf{M}_{p2} \cdot \mathbf{M}_\kappa \\ \mathbf{M}_{2r} &= \mathbf{M}_\kappa \end{aligned} \quad (3.22)$$

Далее определяются соответствующие подматрицы этих полных матриц

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{sr} &= \text{submatrix}(\mathbf{M}_{sr}, 0, 3, 0, 3), \\ \mathbf{B}_{sr} &= \text{submatrix}(\mathbf{M}_{sr}, 0, 3, 4, 7), \\ \mathbf{A}_{1r} &= \text{submatrix}(\mathbf{M}_{1r}, 0, 3, 0, 3), \\ \mathbf{B}_{1r} &= \text{submatrix}(\mathbf{M}_{1r}, 0, 3, 4, 7), \\ \mathbf{A}_{2r} &= \text{submatrix}(\mathbf{M}_{2r}, 0, 3, 0, 3), \\ \mathbf{B}_{2r} &= \text{submatrix}(\mathbf{M}_{2r}, 0, 3, 4, 7), \end{aligned} \quad (3.23)$$

На втором этапе определяется вектор-столбец фазных токов в конце схемы

$$\mathbf{I}_{r\phi} = \mathbf{B}_{sr}^{-1} (\mathbf{E}_{1\phi} - \mathbf{A}_{sr} \mathbf{E}_{2\phi}) \quad (3.24)$$

и векторы-столбцы фазных ВН по концам линии, где установлены ОПН.

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_{1BH} &= \mathbf{A}_{1r} \mathbf{E}_{2\phi} + \mathbf{B}_{1r} \mathbf{I}_{r\phi} \\ \mathbf{U}_{2BH} &= \mathbf{A}_{2r} \mathbf{E}_{2\phi} + \mathbf{B}_{2r} \mathbf{I}_{r\phi} \end{aligned} \quad (3.25)$$

Далее находятся ВН по концам аварийной фазы, в качестве которой согласно рисунок 3.21 принята фаза «0»

$$\mathbf{U}_{1BH} = \mathbf{U}_{1BH0}; \quad \mathbf{U}_{2BH} = \mathbf{U}_{2BH0} \quad (3.26)$$

3.3.3 Анализ восстанавливающихся напряжений и вторичных токов дуги

Используя описанный выше алгоритм, оценим ВТД в средней части линии при аварийной ситуации в фазах и полуфазах.

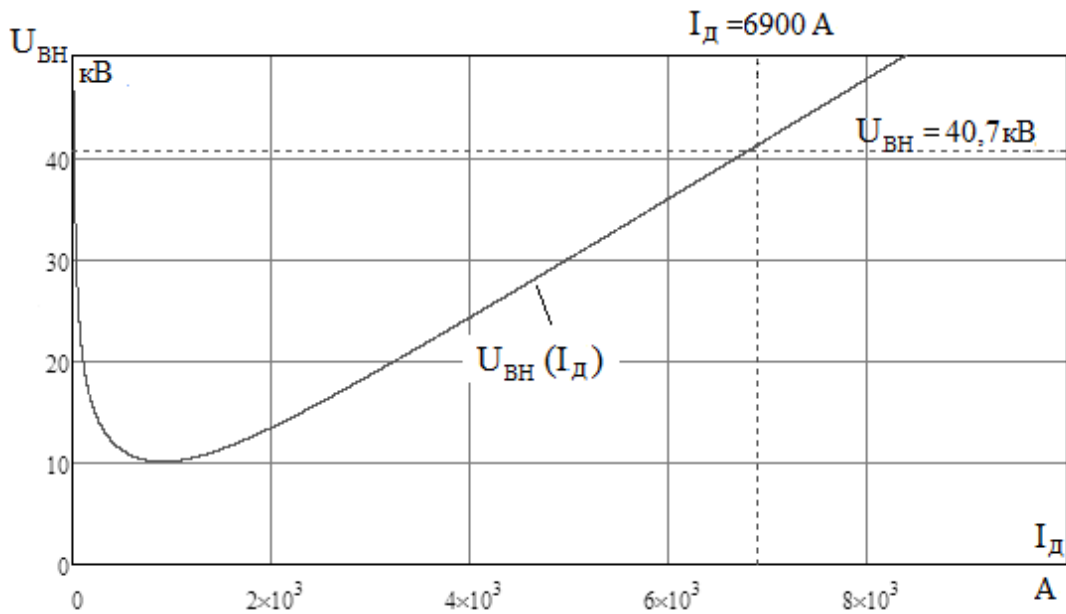


Рисунок 3.22 – Определение условий для гашения ВТД (ОАПВ на Ф0) (вариант I)

Как следует из рисунка 3.22 ВТД намного превосходит 60 А, при котором дуга имеет устойчивый характер. Для создания условий, при которых обеспечивается гашение дуги, следует в паузу ОАПВ зашунтировать УПК в аварийной фазе «0» (Рисунок 3.23). При этом длительность паузы ОАПВ достаточно принять минимальной, равной 0,5 сек.

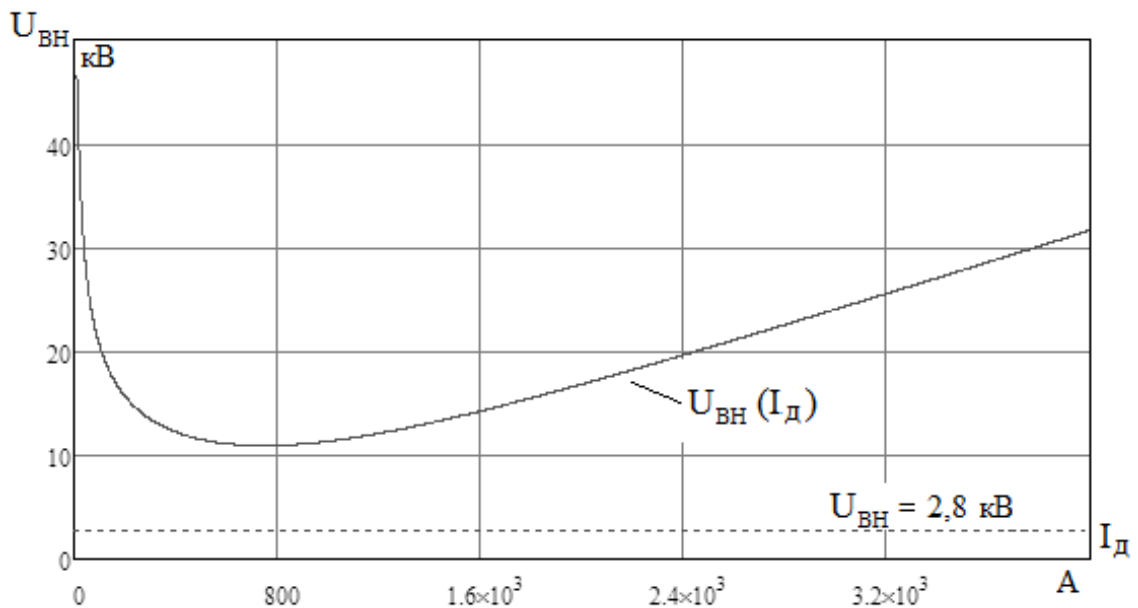


Рисунок 3.23 – Определение условий для гашения ВТД (ОАПВ на Ф0), УПК зашунтирована (вариант I)

Как показывает анализ условий для гашения ВТД при ОАПВ на Ф0 для варианта II, то в этом случае достаточно, как и в варианте I, в паузу ОАПВ зашунтировать УПК в аварийной фазе «0».

Ликвидация неустойчивых дуговых замыканий на фазе «1» осуществляется так же, как и фазе «0» с тем лишь различием, что в паузу ОАПВ шунтируется УПК в аварийной фазе «1».

Что касается полуфаз «2» и «3», то успешное ОАПВ имеет место после отключения соответствующей аварийной полуфазы, поскольку полуфазы не оснащаются УПК. Для примера на рисунке 3.24 показаны условия для гашения ВТД в паузу ОАПВ для ПФ2.

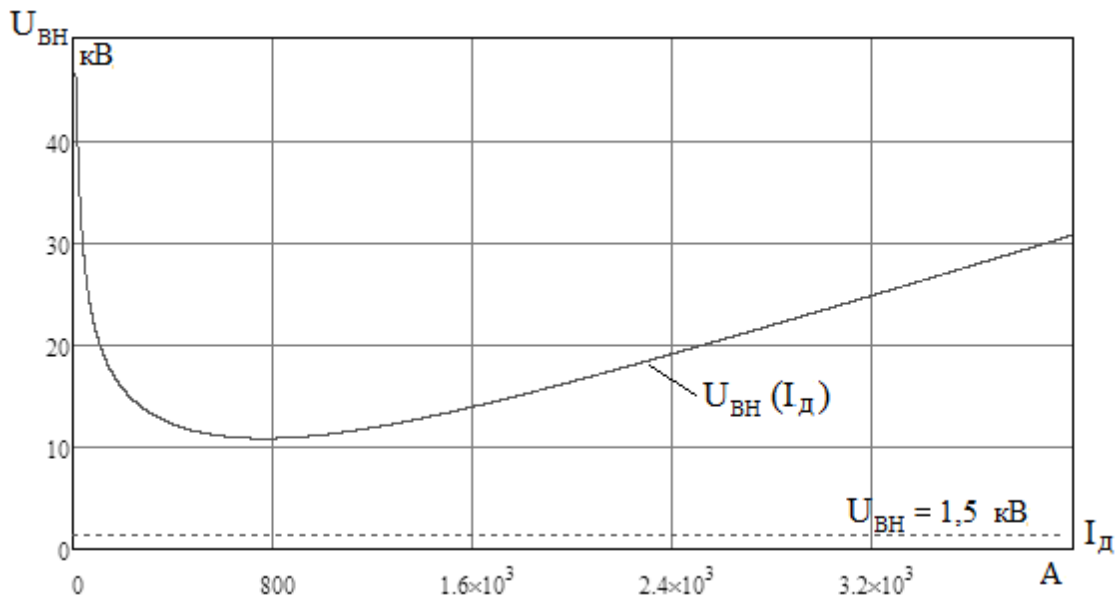


Рисунок 3.24 – Определение условий для гашения ВТД в паузу ОАПВ для ПФ2

Как было отмечено выше, одним из ограничений при проведении успешного ОАПВ с АШФ является отсутствие недопустимых (выше 255 кВ) воздействующих напряжений на ОПН при расшунтировании фазы или полуфазы. Определяющим при этом фактором является общее число подключённых к линии НШР.

Как следует из таблицы 3.8, условия близкие к резонансным в варианте I имеют место при расшунтировании фаз, когда к линии подключено три НШР, а в

случае расшунтирования полуфаз ограничение на число подключенных к линии НШР отсутствует.

Таблица 3.8 – Воздействия на ОПН при расшунтировании в зависимости от числа установленных НШР на линии (вариант I)

Количество 4-фазных НШР на ВЛ	Наибольшие напряжения, воздействующие на ОПН, при расшунтировании фазы или полуфазы (кВ)			
	Ф0	Ф1	ПФ2	ПФ3
0	106	111	47	53
1	89	159	74	46
2	182	211	115	126
3	1606	5020	213	93
4	162	184	58	66

Что касается варианта II, то условия близкие к резонансным в варианте II имеют место при расшунтировании фаз, когда к линии подключено четыре НШР, а при расшунтировании полуфаз близкие к резонансным условия имеют место, когда к линии подключено три НШР.

Таблица 3.9 – Воздействия на ОПН при расшунтировании в зависимости от числа установленных НШР на линии (вариант I I)

Количество 4-фазных НШР на ВЛ	Наибольшие напряжения, воздействующие на ОПН, при расшунтировании фазы или полуфазы (кВ)			
	Ф0	Ф1	ПФ2	ПФ3
0	107	113	49	57
1	96	141	70	56
2	139	142	94	114
3	149	238	4490	2270
4	1080	1400	94	96

Выводы по главе 3

1. Использование неуправляемых шунтирующих реакторов, снабженных нейтральным реактором, показало их неэффективность гашения дуги в паузу ОАПВ длительностью менее 1,0 сек.

2. Применение управляемых шунтирующих реакторов, позволяющих иметь пофазно различные проводимости, обеспечивает успешное гашение дуги в паузу ОАПВ длительностью порядка 0,5 сек.

3. Показано, что если для компенсации зарядной мощности линии в нормальных режимах предусмотрены неуправляемые шунтирующие реакторы, то для осуществления успешного ОАПВ с длительностью бестоковой паузы не более 0,5 сек рекомендуется использовать автоматическое шунтирование аварийной фазы по её концам.

ГЛАВА 4 АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ УГЛОВ ОТКЛОНЕНИЯ В ПАУЗУ ОДНОФАЗНОГО АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОВТОРНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ

4.1 Общие положения

Для анализа динамической устойчивости отправной станции ограничимся простейшей расчётной схемой, отражающей работу станции через ЧТЛ на ШБМ (Рисунок 4.1).

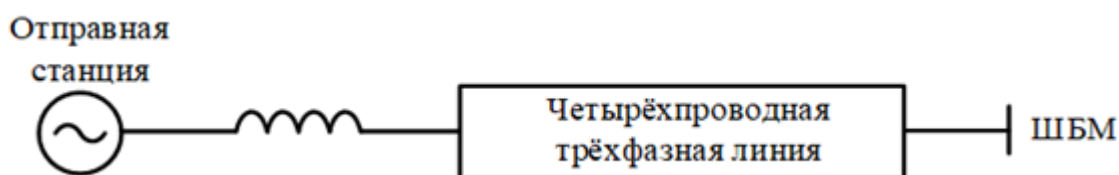


Рисунок 4.1 – Расчетная схема для анализа динамической устойчивости

Динамический переход рассматривается при помощи угловых характеристик режимов, в частности, нормального, ОКЗ, ОАПВ и послеаварийного режимов.

С помощью уравнения движения ротора можем определить изменение угла генераторов [56, 57]

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{18000}{T_j \cdot S_{cm}} [P_T(t) - P_{эм}(\delta, t)], \quad (4.1)$$

Воспользовавшись функцией Хевисайда [58] электромагнитную мощность можно выразить следующим образом

$$P_{эм}(\delta, t) = (\Phi(t-0) - \Phi(t-t_{окз})) \cdot P_{окз}(\delta) + (\Phi(t-t_{окз}) - \Phi(t-t_{оапв})) P_{оапв}(\delta) + \Phi(t-t_{оапв}) \cdot P_{n/a}(\delta) \quad (4.2)$$

где $P_{окз}(\delta)$, $P_{оапв}(\delta)$, $P_{n/a}(\delta)$ – угловые характеристики соответственно в режимах ОКЗ, ОАПВ и послеаварийном режиме.

4.2 Угловые характеристики отправного генератора в характерных режимах

Как показано в [59], угловые характеристики в характерных режимах для трехфазных систем определяются путём добавления шунтов или продольных сопротивлений в схеме прямой последовательности. Однако для рассматриваемых в данной работе схем такой подход неприемлем в силу их сложности, и поэтому угловая характеристика определяется через скалярное произведение вектора тока отправной станции на её вектор ЭДС.

4.2.1 Угловая характеристика в нормальном режиме

На рисунке 4.2 показана расчётная схема, соответствующая нормальному режиму.

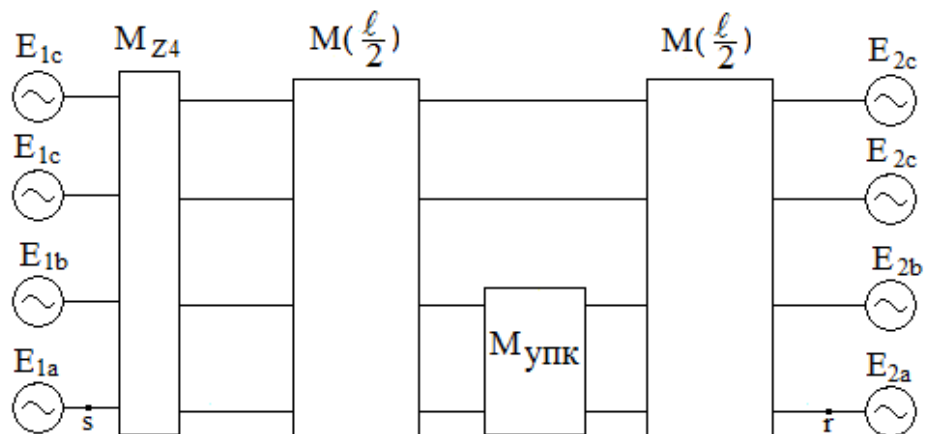


Рисунок 4.2 – Расчётная схема, соответствующая нормальному режиму

Динамическая устойчивость обычно оценивается в режиме передачи максимальной мощности, когда ШР отключены от линии.

Алгоритм для определения угловой характеристики включает следующие этапы. Сначала определяется полная фазная матрица всей схемы согласно (4.3).

$$\mathbf{M}_H = \mathbf{M}_{Z4} \cdot \mathbf{M}(\frac{l}{2}) \cdot \mathbf{M}_{упк} \cdot \mathbf{M}(\frac{l}{2}) \quad (4.3)$$

Далее определяются соответствующие подматрицы этой полной матрицы

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_H &= \text{submatrix}(\mathbf{M}_H, 0, 3, 0, 3), \\ \mathbf{B}_H &= \text{submatrix}(\mathbf{M}_H, 0, 3, 4, 7), \\ \mathbf{C}_H &= \text{submatrix}(\mathbf{M}_H, 0, 3, 4, 7), \\ \mathbf{D}_H &= \text{submatrix}(\mathbf{M}_H, 4, 7, 4, 7). \end{aligned} \quad (4.4)$$

Вектор-столбец фазных и полуфазных токов в конце схемы найдётся

$$\mathbf{I}_{rH}(\delta) = \mathbf{B}_H^{-1}(\mathbf{E}_{1\phi}(\delta) - \mathbf{A}_H \mathbf{E}_{2\phi}) \quad (4.5)$$

Вектор - столбцы заданных ЭДС по концам линии, входящие в выражение (4.5), определяются как

$$\mathbf{E}_{1\phi}(\delta) = E_{1\phi} e^{i\delta} \begin{vmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \\ a \end{vmatrix}, \mathbf{E}_{2\phi} = \frac{500}{\sqrt{3}} \begin{vmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \\ a \end{vmatrix} \quad (4.6)$$

где $E_{1\phi}$ - модуль фазной ЭДС на отправном конце, соответствующий заданному нормальному режиму, δ -угловой сдвиг между концевыми ЭДС.

Соответственно вектор-столбец фазных и полуфазных токов в нормальном режиме в начале линии найдётся

$$\mathbf{I}_{SH}(\delta) = \begin{vmatrix} I_{H0} \\ I_{H1} \\ I_{H2} \\ I_{H3} \end{vmatrix} = \mathbf{C}_H \mathbf{E}_{2\phi} + \mathbf{D}_H \mathbf{I}_{rH}(\delta) \quad (4.7)$$

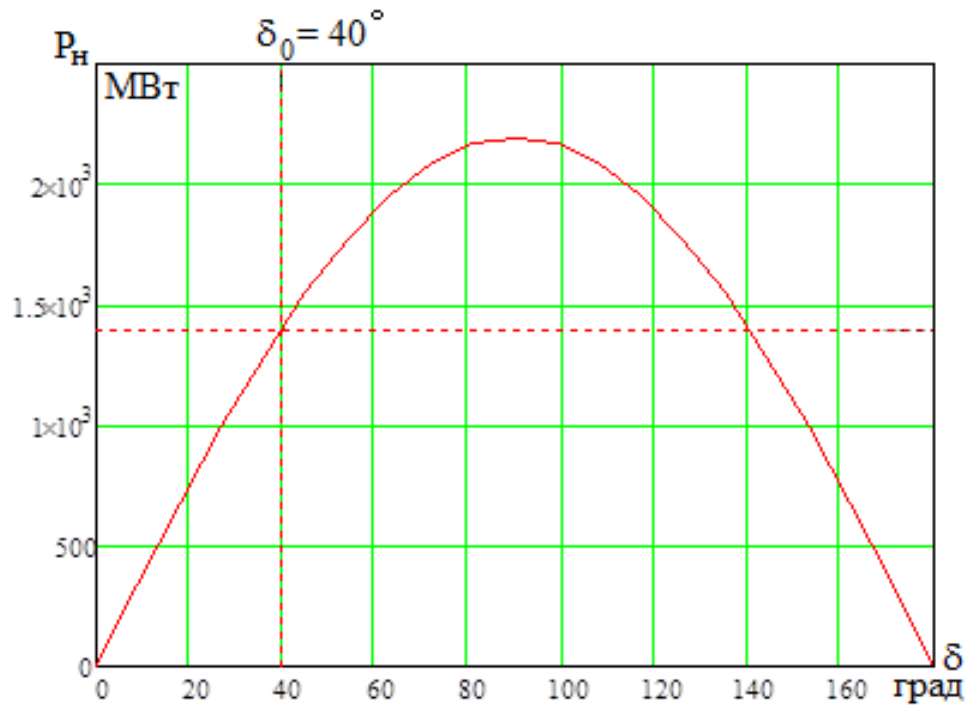
Полная мощность нормального режима определяется как скалярное произведение ЭДС на ток в начале линии

$$S_H(\delta) = \mathbf{E}_{1\phi}(\delta) \mathbf{I}_{SH}(\delta) \quad (4.8)$$

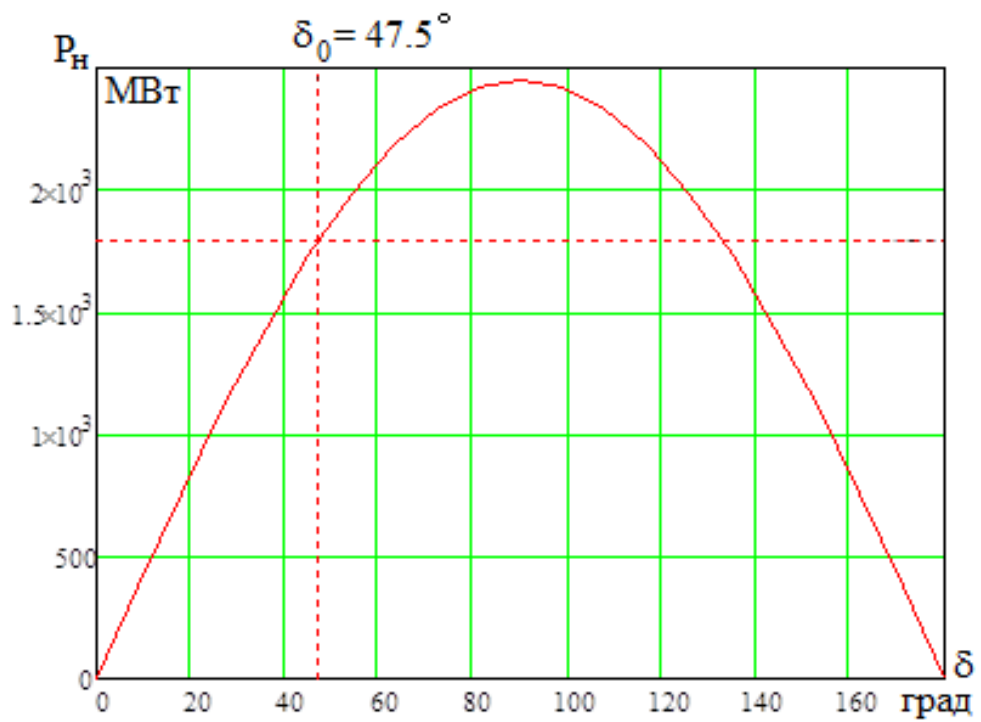
Активная мощность в начале является угловой характеристикой

$$P_H(\delta) = \text{Re } S_H(\delta) \quad (4.9)$$

На рисунке 4.3 приведены угловые характеристики для вариантов I и II, отличающихся разными конструкциями фаз и полуфаз линии.



а)



б)

Рисунок 4.3 – Угловая характеристика нормального режима: вариант I (а);
вариант II (б)

4.2.2 Угловая характеристика в режиме однофазного короткого замыкания

На рисунке 4.4 показана расчётная схема, соответствующая режиму ОКЗ.

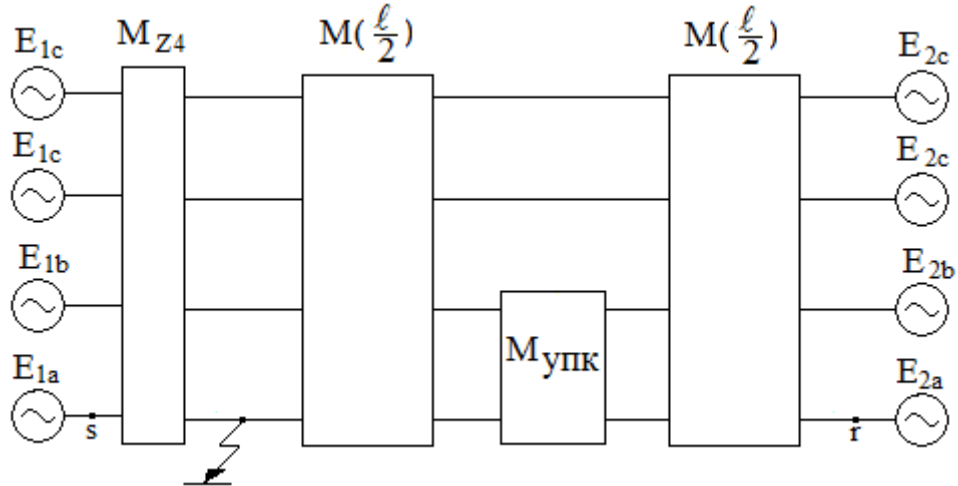


Рисунок 4.4 – Расчётная схема, соответствующая режиму ОКЗ

Наибольшее снижение активной мощности в режиме ОКЗ имеет место при ОКЗ в начале линии.

Ниже представлен алгоритм для определения угловой характеристики, согласно которому сначала определяется полная фазная матрица всей схемы

$$\mathbf{M}_{ОКЗ} = \mathbf{M}_{Z4} \cdot \mathbf{M}_{\Pi} \cdot \mathbf{M}(\frac{l}{2}) \cdot \mathbf{M}_{ук} \cdot \mathbf{M}(\frac{l}{2}) \quad (4.10)$$

Далее определяются соответствующие подматрицы этой полной матрицы

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{ОКЗ} &= \text{submatrix}(\mathbf{M}_{ОКЗ}, 0, 3, 0, 3), \\ \mathbf{B}_{ОКЗ} &= \text{submatrix}(\mathbf{M}_{ОКЗ}, 0, 3, 4, 7), \\ \mathbf{C}_{ОКЗ} &= \text{submatrix}(\mathbf{M}_{ОКЗ}, 0, 3, 4, 7), \\ \mathbf{D}_{ОКЗ} &= \text{submatrix}(\mathbf{M}_{ОКЗ}, 4, 7, 4, 7). \end{aligned} \quad (4.11)$$

Определив вектор-столбец фазных и полуфазных токов в конце схемы

$$\mathbf{I}_{rОКЗ}(\delta) = \mathbf{B}_{окз}^{-1}(\mathbf{E}_{1\phi}(\delta) - \mathbf{A}_{окз} \mathbf{E}_{2\phi}) \quad (4.12)$$

где $\mathbf{E}_{1\phi}(\delta)$, $\mathbf{E}_{2\phi}$ – вектор-столбцы фазных ЭДС, определяемые соотношением (4.6),

Найдём вектор-столбец фазных токов в начале линии

$$\mathbf{I}_{SOK3}(\delta) = \mathbf{C}_{OK3} \mathbf{E}_{2\phi} + \mathbf{D}_{OK3} \mathbf{I}_{rOK3}(\delta) \quad (4.13)$$

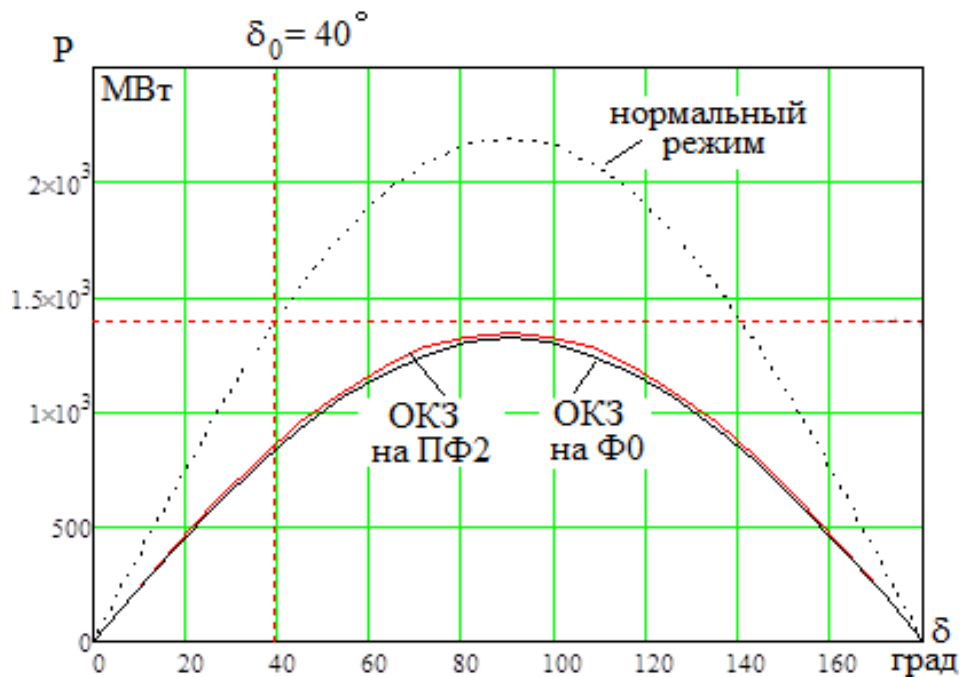
Полная мощность нормального режима определяется как скалярное произведение ЭДС на ток в начале линии

$$S_{OK3}(\delta) = \mathbf{E}_{1\phi}(\delta) \mathbf{I}_{SOK3}(\delta) \quad (4.14)$$

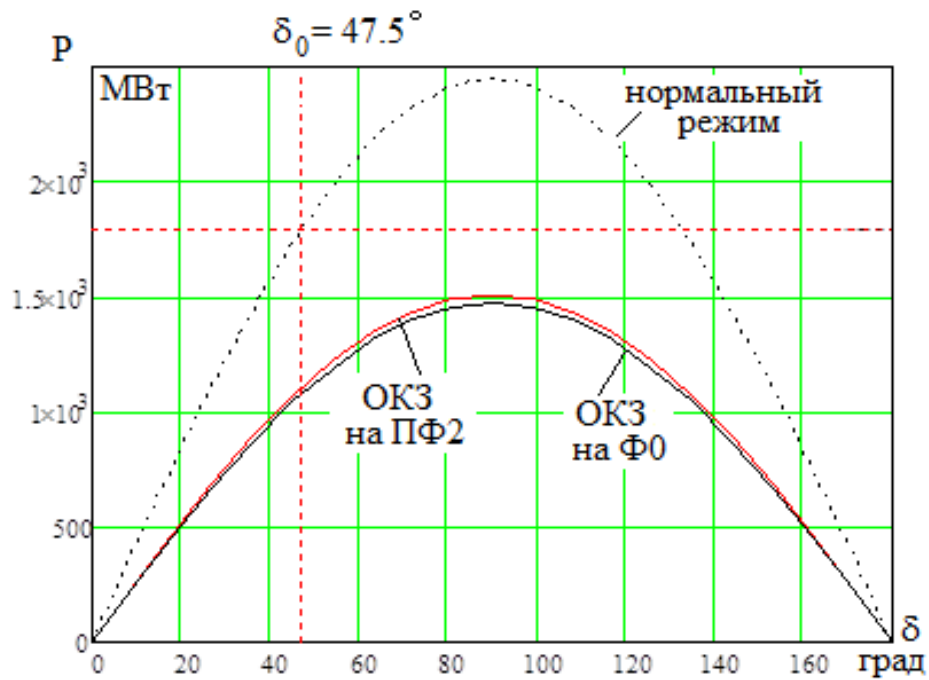
Активная мощность в начале является угловой характеристикой

$$P_{OK3}(\delta) = \text{Re } S_{OK3}(\delta) \quad (4.15)$$

На рисунке 4.5 приведены угловые характеристики в режиме ОКЗ для вариантов I и II, отличающихся разными конструкциями фаз и полуфаз линии. Угловые характеристики при ОКЗ на фазе Φ_0 и полуфазе ПФ2 практически совпадают.



а)



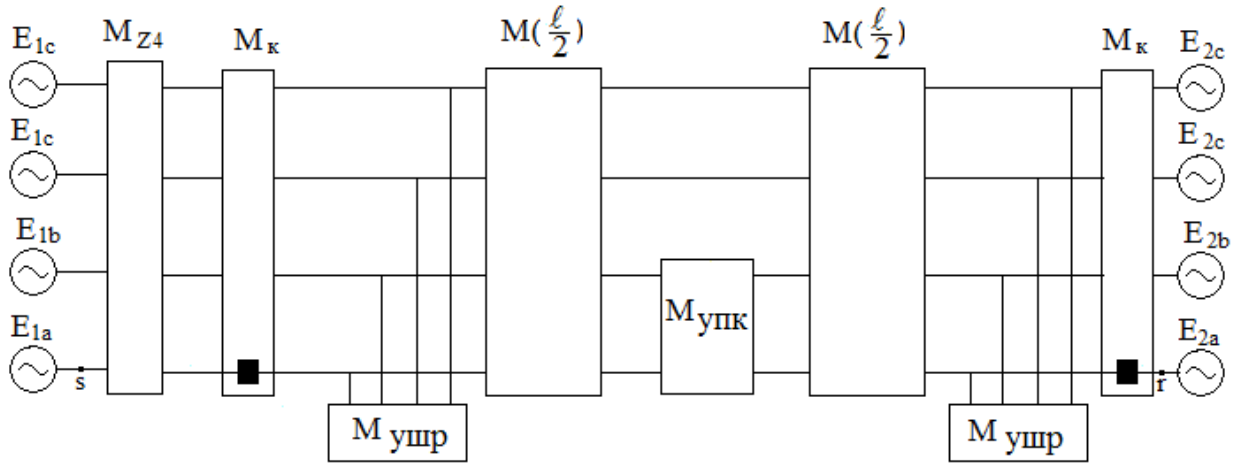
б)

Рисунок 4.5 – Угловая характеристика режиме ОКЗ: вариант I (а); вариант II (б)

4.2.3 Угловые характеристика в режиме ликвидации дуги

Как было показано в главе 3, применение НШР для ликвидации дуги не решает в полной мере эту проблему, поскольку в ряде случаев дуга вообще не гасится, а в тех случаях, когда гашение дуги возможно, длительность паузы ОАПВ заметно превышает 1,0 сек. Поэтому предпочтительными являются варианты осуществления ОАПВ либо с использованием УШР, либо с применением АШФ.

Угловые характеристики с применением УШР. На рисунке 4.6 показана расчётная схема УШР, соответствующая режиму ОАПВ.



Рисунке 4.6 – Расчётная схема с УШР, соответствующая режиму ОАПВ

Ниже представлен алгоритм для определения угловой характеристики, согласно которому сначала определяется полная фазная матрица всей схемы

$$\mathbf{M}_{oanb} = \mathbf{M}_{Z4} \cdot \mathbf{M}_{\kappa} \cdot \mathbf{M}_{ушр} \cdot \mathbf{M}(\frac{\ell}{2}) \cdot \mathbf{M}_{упк} \cdot \mathbf{M}(\frac{\ell}{2}) \cdot \mathbf{M}_{ушр} \cdot \mathbf{M}_{\kappa} \quad (4.16)$$

Далее определяются соответствующие подматрицы этой полной матрицы

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{oanb} &= \text{submatrix}(\mathbf{M}_{oanb}, 0, 3, 0, 3), \\ \mathbf{B}_{oanb} &= \text{submatrix}(\mathbf{M}_{oanb}, 0, 3, 4, 7), \\ \mathbf{C}_{oanb} &= \text{submatrix}(\mathbf{M}_{oanb}, 0, 3, 4, 7), \\ \mathbf{D}_{oanb} &= \text{submatrix}(\mathbf{M}_{oanb}, 4, 7, 4, 7). \end{aligned} \quad (4.17)$$

Ниже определяется вектор-столбец фазных и полуфазных токов в конце схемы

$$\mathbf{I}_{roanb}(\delta) = \mathbf{B}_{oanb}^{-1} (\mathbf{E}_{1\phi}(\delta) - \mathbf{A}_{oanb} \mathbf{E}_{2\phi}) \quad (4.18)$$

где $\mathbf{E}_{1\phi}(\delta), \mathbf{E}_{2\phi}$ – вектор-столбцы фазных ЭДС, определяемые соотношением (4.6).

Далее находится вектор-столбец фазных и полуфазных токов в начале линии

$$\mathbf{I}_{soanb}(\delta) = \mathbf{C}_{oanb} \mathbf{E}_{2\phi} + \mathbf{D}_{oanb} \mathbf{I}_{roanb}(\delta) \quad (4.19)$$

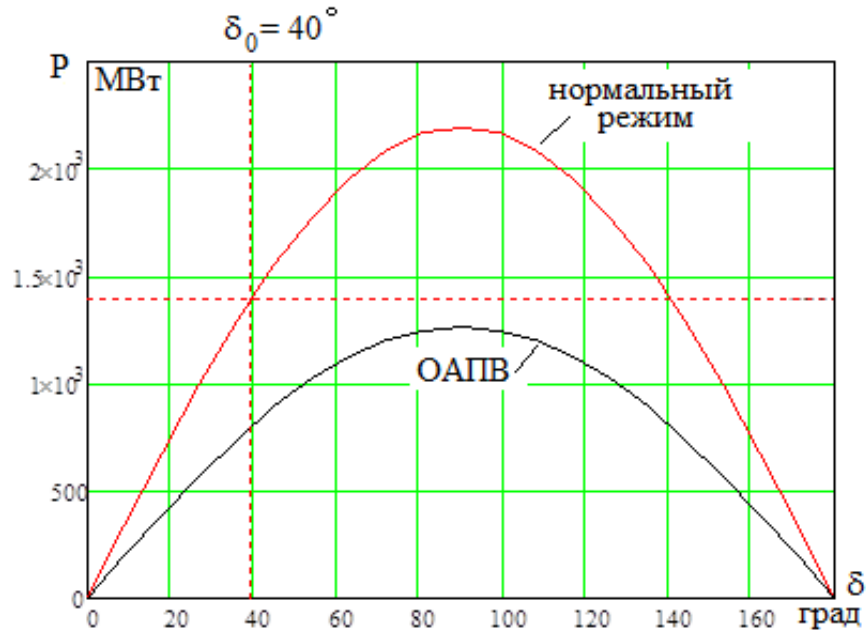
Полная мощность в режиме ОАПВ определяется как скалярное произведение ЭДС на ток в начале линии

$$S_{oanb}(\delta) = \mathbf{E}_{1\phi}(\delta) \mathbf{I}_{soanb}(\delta) \quad (4.20)$$

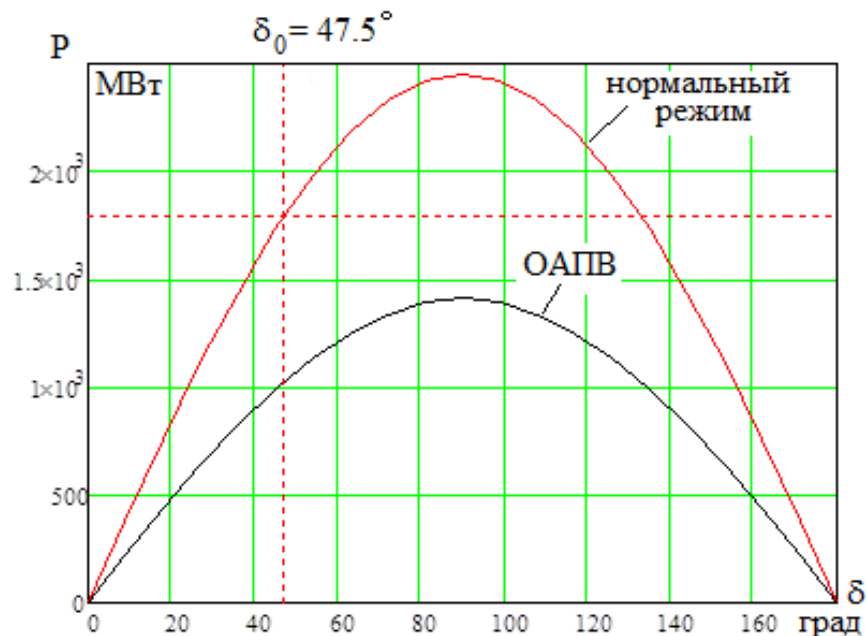
Активная мощность в начале является угловой характеристикой

$$P_{oapb}(\delta) = \operatorname{Re} S_{oapb}(\delta) \quad (4.21)$$

На рисунке 4.7 приведены угловые характеристики в режиме ОАПВ для вариантов I и II, отличающихся разными конструкциями фаз и полуфаз линии при ОАПВ на фазе Φ_0 .



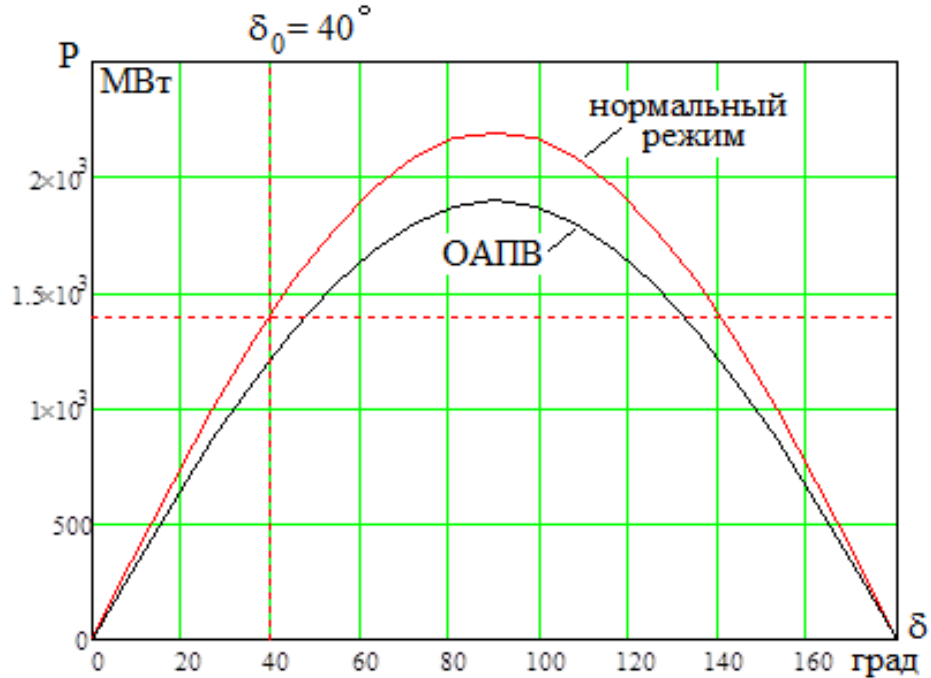
а)



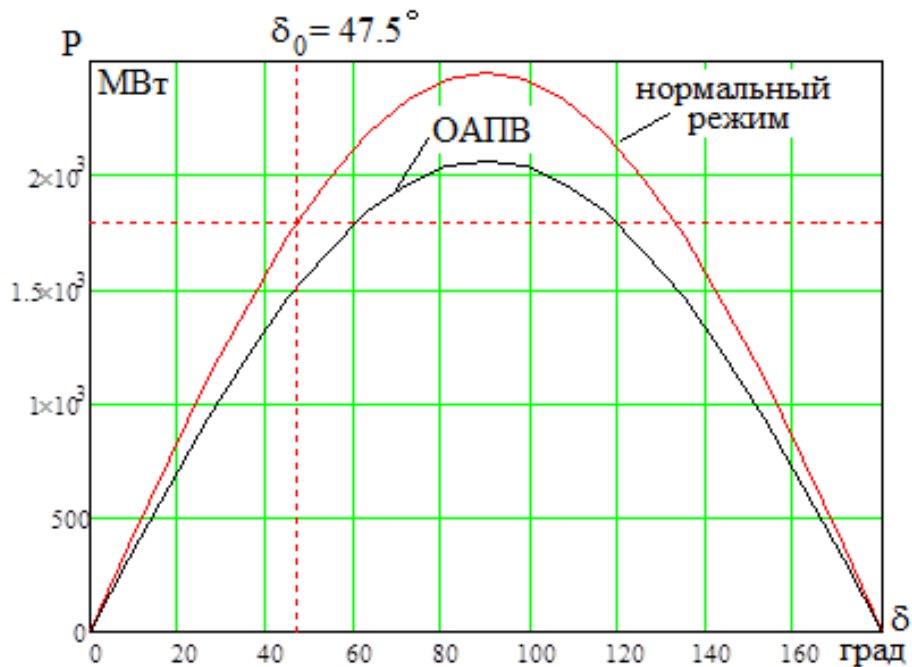
б)

Рисунок 4.7 – Угловая характеристика в режиме ОАПВ при аварии на Φ_0 :
вариант I (а); вариант II (б)

При аварийной ситуации на ПФ2 при ОАПВ на этой полуфазе сохраняется трёхфазный режим, что и обеспечивает более благоприятную угловую характеристику (Рисунок 4.8).



а)



б)

Рисунок 4.8 – Угловая характеристика в режиме ОАПВ при аварии на ПФ2:
вариант I (а); вариант II (б)

Угловые характеристики с применением АШФ

На рисунке 4.9 показана расчётная схема, соответствующая режиму ОАПВ.

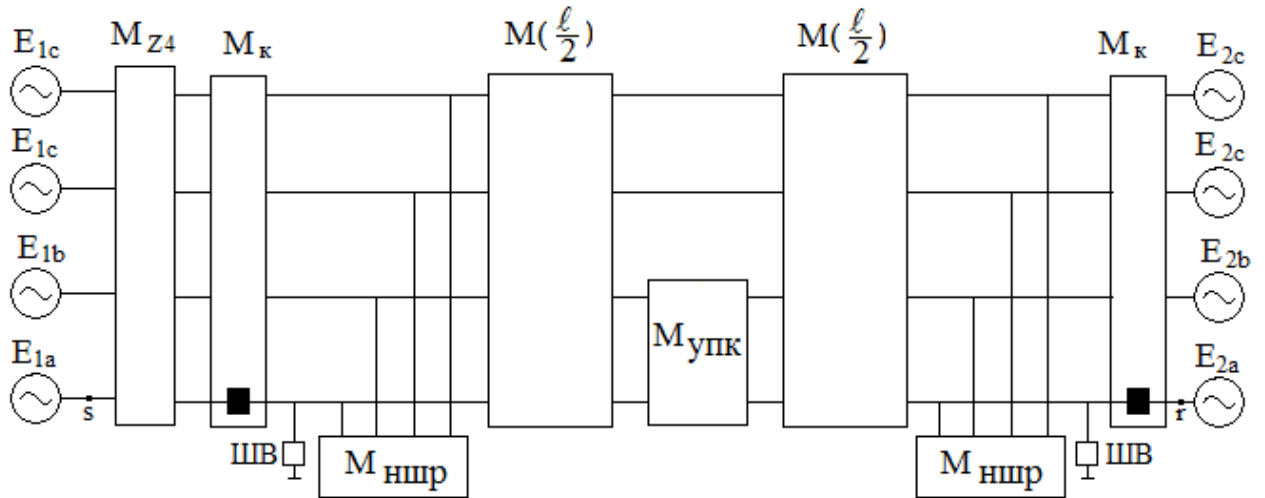


Рисунок 4.9 – Расчётная схема с применением АШФ, соответствующая режиму ОАПВ

При использовании АШФ отсутствует необходимость подключения НШР, отключенных от линии в рассматриваемом режиме передачи максимальной мощности.

Ниже представлен алгоритм для определения угловой характеристики, согласно которому сначала определяется полная фазная матрица всей схемы

$$\mathbf{M}_{a\text{шф}} = \mathbf{M}_{Z4} \cdot \mathbf{M}_K \cdot \mathbf{M}_{ш} \cdot \mathbf{M}(\ell/2) \cdot \mathbf{M}_{упк} \cdot \mathbf{M}(\ell/2) \cdot \mathbf{M}_{ш} \cdot \mathbf{M}_K \quad (4.22)$$

Далее определяются соответствующие подматрицы этой полной матрицы

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{a\text{шф}} &= \text{submatrix}(\mathbf{M}_{a\text{шф}}, 0, 3, 0, 3), \\ \mathbf{B}_{a\text{шф}} &= \text{submatrix}(\mathbf{M}_{a\text{шф}}, 0, 3, 4, 7), \\ \mathbf{C}_{a\text{шф}} &= \text{submatrix}(\mathbf{M}_{a\text{шф}}, 0, 3, 4, 7), \\ \mathbf{D}_{a\text{шф}} &= \text{submatrix}(\mathbf{M}_{a\text{шф}}, 4, 7, 4, 7). \end{aligned} \quad (4.23)$$

Ниже определяется вектор-столбец фазных и полуфазных токов в конце схемы

$$\mathbf{I}_{ra\text{шф}}(\delta) = \mathbf{B}_{a\text{шф}}^{-1} (\mathbf{E}_{1\phi}(\delta) - \mathbf{A}_{a\text{шф}} \mathbf{E}_{2\phi}) \quad (4.24)$$

где $\mathbf{E}_{1\phi}(\delta), \mathbf{E}_{2\phi}$ – вектор-столбцы фазных ЭДС, определяемые соотношением (4.6).

Далее находится вектор-столбец фазных и полуфазных токов в начале линии

$$\mathbf{I}_{sauf}(\delta) = \mathbf{C}_{auf} \mathbf{E}_{2\phi} + \mathbf{D}_{auf} \mathbf{I}_{rauf}(\delta) \quad (4.25)$$

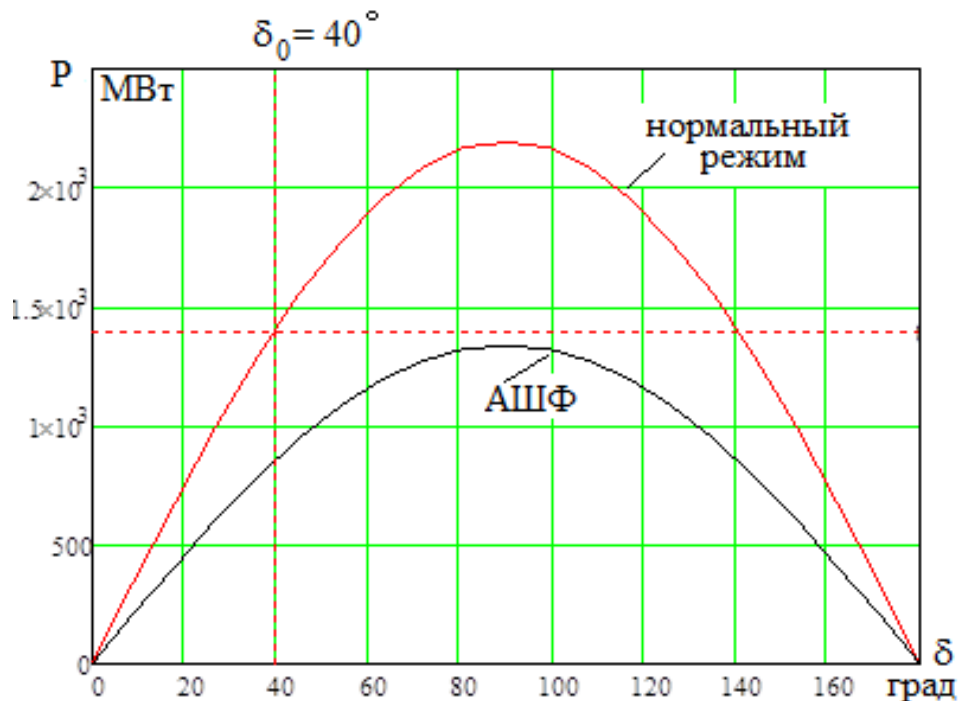
Полная мощность в режиме ОАПВ определяется как скалярное произведение ЭДС на ток в начале линии

$$S_{auf}(\delta) = \mathbf{E}_{1\phi}(\delta) \mathbf{I}_{sauf}(\delta) \quad (4.26)$$

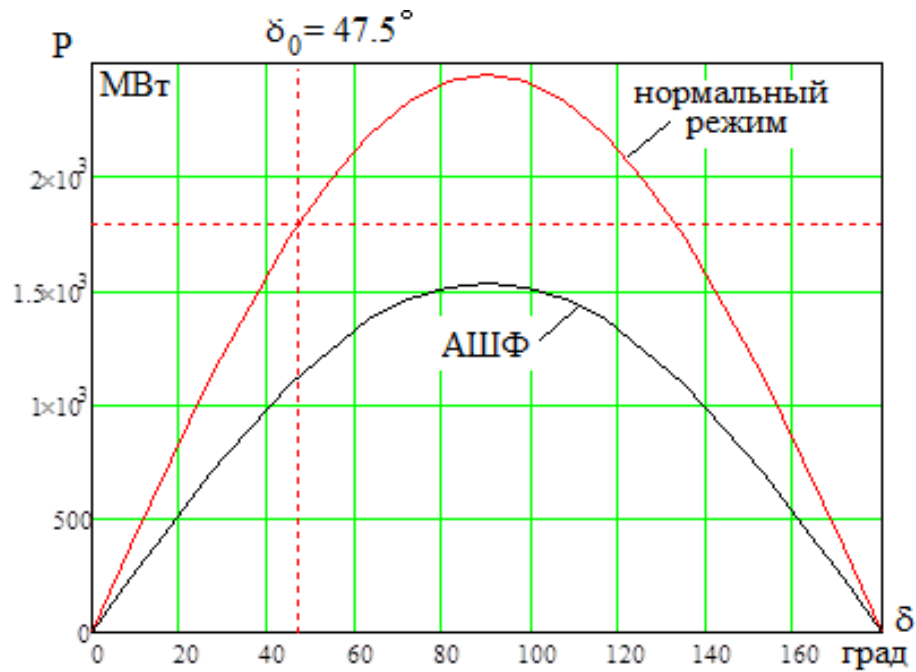
Активная мощность в начале является угловой характеристикой

$$P_{auf}(\delta) = \operatorname{Re} S_{auf}(\delta) \quad (4.27)$$

На рисунке 4.10 приведены угловые характеристики в режиме АШФ для вариантов I и II, отличающихся разными конструкциями фаз и полуфаз линии при ОАПВ на фазе Φ_0 .



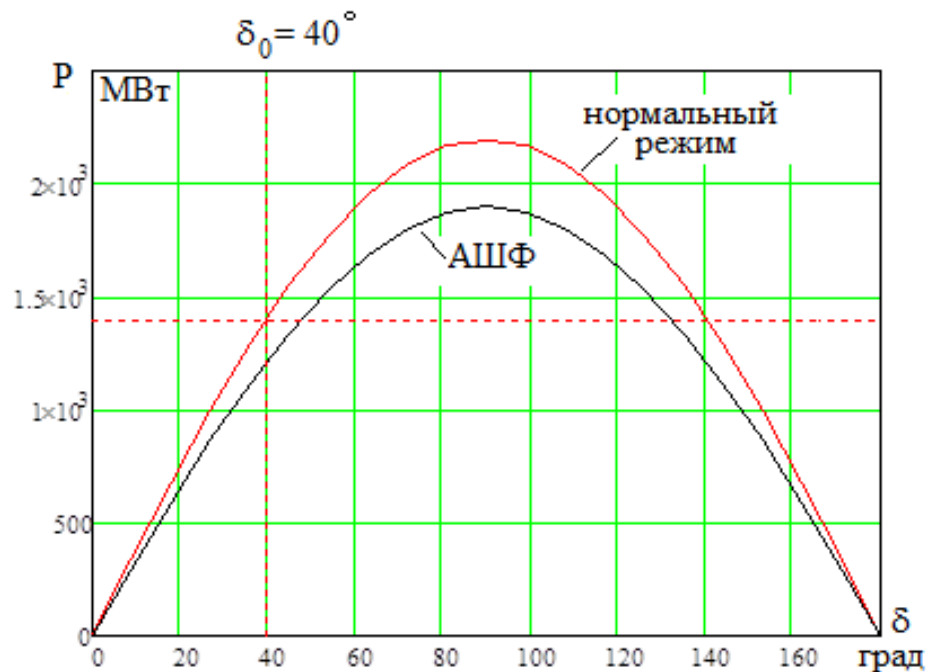
а)



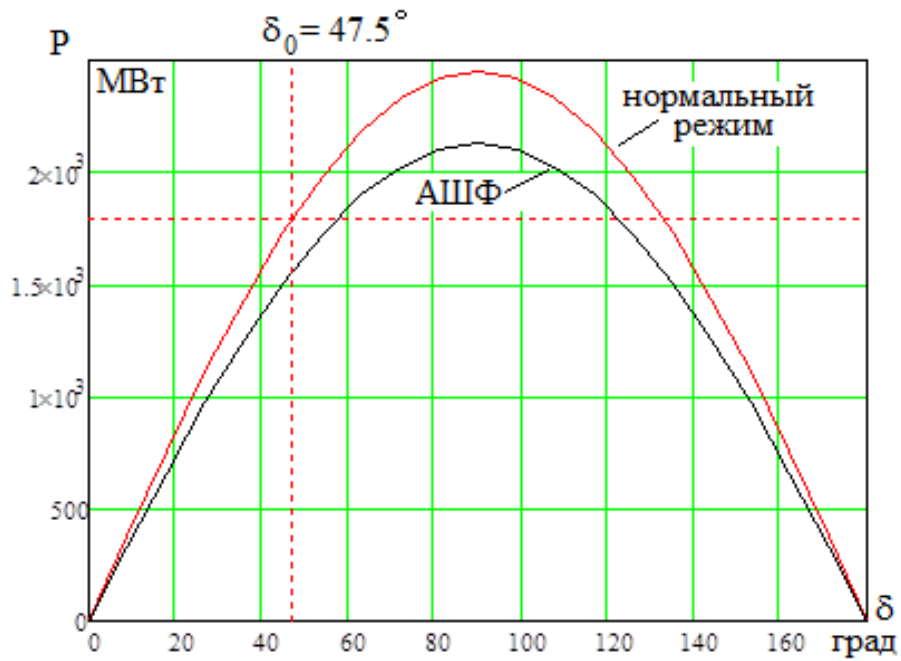
б)

Рисунок 4.10 – Угловая характеристика в режиме АШФ при аварии на F_0 :
вариант I (а); вариант II (б)

При аварийной ситуации на ПФ2 при ОАПВ на этой полуфазе сохраняется трёхфазный режим, что и обеспечивает более благоприятную угловую характеристику (Рисунок 4.11).



а)



б)

Рисунок 4.11 – Угловая характеристика в режиме АШФ при аварии на ПФ2:
вариант I (а); вариант II (б)

4.2.4 Угловая характеристика в послеаварийном режиме

Угловая характеристика, соответствующая динамическому переходу с использованием АШФ, совпадает с угловой характеристикой для нормального режима

$$P_{na.ашф}(\delta) = P_n(\delta) \quad (4.28)$$

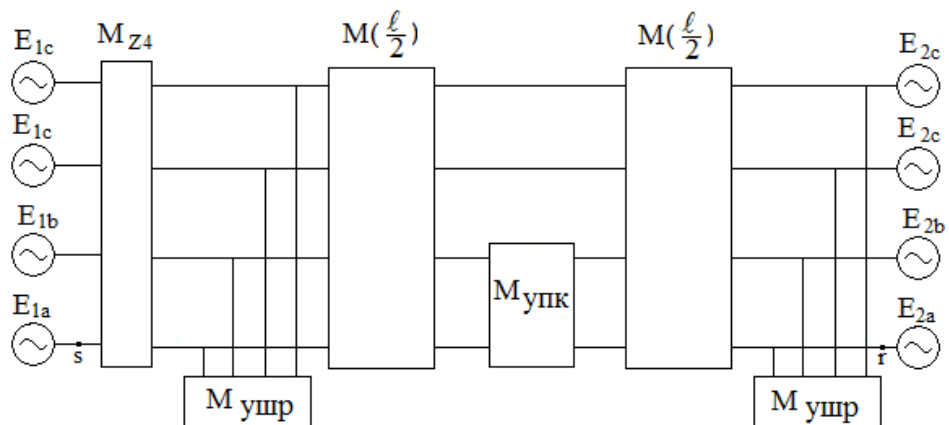


Рисунок 4.12 – Расчётная схема, соответствующая послеаварийному режиму в
схеме с УШР

Что касается угловой характеристики, соответствующей динамическому переходу с использованием УШР, то на рисунке 4.12 показана расчетная схема, которая отличается от расчетной схемы на рисунке 4.2 наличием по концам линии неотключенных УШР.

Алгоритм для определения угловой характеристики послеаварийного режима для схемы с УШР включает следующие этапы. Сначала определяется полная фазная матрица всей схемы согласно (4.3).

$$\mathbf{M}_{na.yup} = \mathbf{M}_{Z4} \cdot \mathbf{M}_{yup} \cdot \mathbf{M}^{(\ell/2)} \cdot \mathbf{M}_{yupk} \cdot \mathbf{M}^{(\ell/2)} \cdot \mathbf{M}_{yup} \quad (4.29)$$

Далее определяются соответствующие подматрицы этой полной матрицы

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{na.yup} &= \text{submatrix}(\mathbf{M}_{na.yup}, 0, 3, 0, 3), \\ \mathbf{B}_{na.yup} &= \text{submatrix}(\mathbf{M}_{na.yup}, 0, 3, 4, 7), \\ \mathbf{C}_{na.yup} &= \text{submatrix}(\mathbf{M}_{na.yup}, 0, 3, 4, 7), \\ \mathbf{D}_{na.yup} &= \text{submatrix}(\mathbf{M}_{na.yup}, 4, 7, 4, 7). \end{aligned} \quad (4.30)$$

Определив вектор-столбец фазных и полуфазных токов в конце схемы

$$\mathbf{I}_{rna.yup}(\delta) = \mathbf{B}_{na.yup}^{-1} (\mathbf{E}_{1\phi}(\delta) - \mathbf{A}_{na.yup} \mathbf{E}_{2\phi}) \quad (4.31)$$

где $\mathbf{E}_{1\phi}(\delta), \mathbf{E}_{2\phi}$ – вектор-столбцы фазных ЭДС, определяемые соотношением (4.6).

Далее находится вектор-столбец фазных и полуфазных токов в начале линии

$$\mathbf{I}_{sna.yup}(\delta) = \mathbf{C}_{na.yup} \mathbf{E}_{2\phi} + \mathbf{D}_{na.yup} \mathbf{I}_{rna.yup}(\delta) \quad (4.32)$$

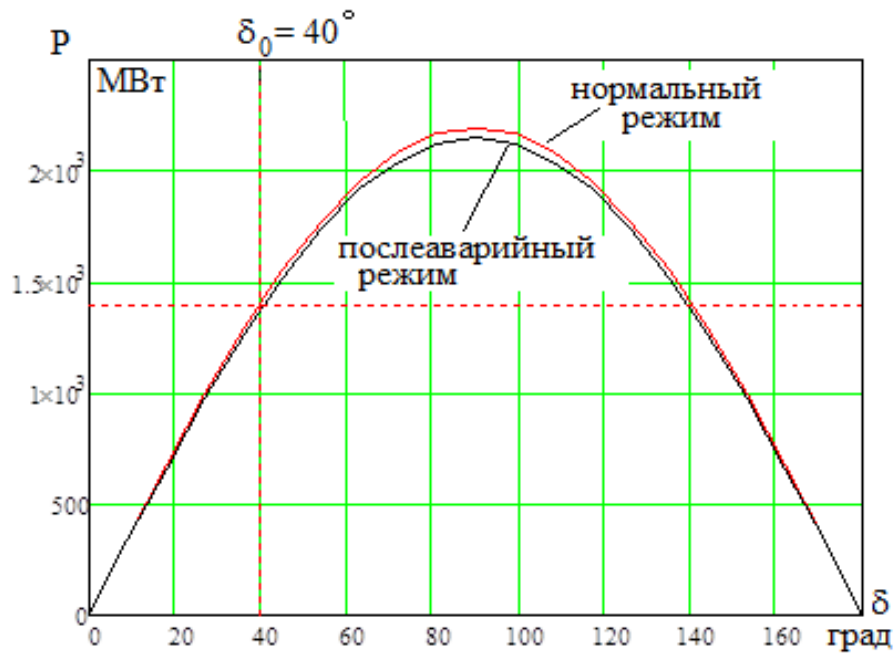
Полная мощность нормального режима определяется как скалярное произведение ЭДС на ток в начале линии

$$S_{na.yup}(\delta) = \mathbf{E}_{1\phi}(\delta) \mathbf{I}_{sna.yup}(\delta) \quad (4.33)$$

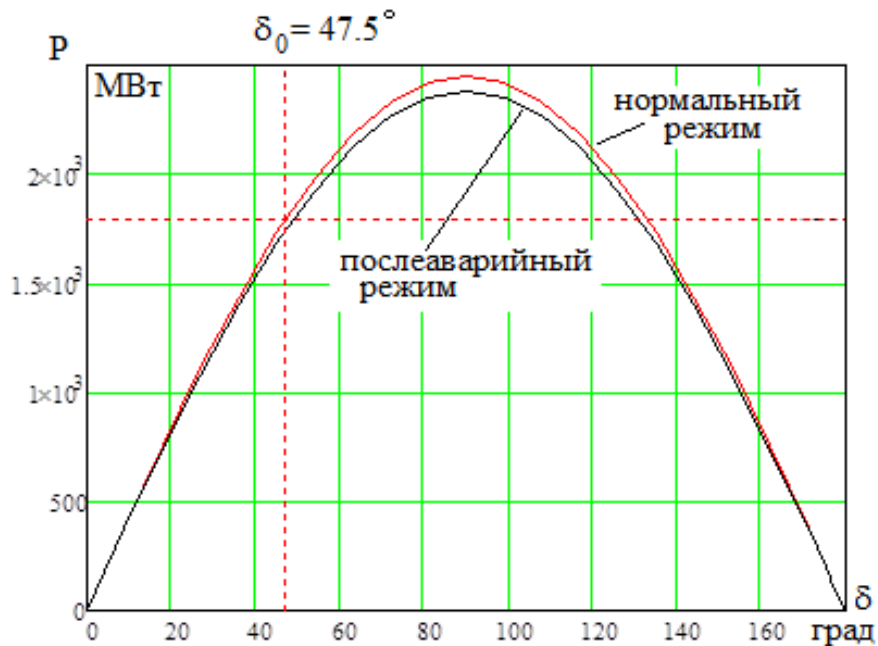
Активная мощность в начале является угловой характеристикой

$$P_{na.yup}(\delta) = \text{Re } S_{na.yup}(\delta) \quad (4.34)$$

На рисунке 4.13 приведены угловые характеристики для вариантов I и II, отличающихся разными конструкциями фаз и полуфаз линии.



а)



б)

Рисунок 4.13 – Угловая характеристика послеаварийного режима в схеме с УШР: вариант I (а); вариант II (б)

4.3 Совместный анализ динамической устойчивости отправной станции и режима на линии в паузу однофазного автоматического повторного включения

В [60] было показано, что ВТД зависит от угла отклонения, изменяющегося в процессе динамического перехода, и соответственно длительность искомой

паузы ОАПВ, определяющей характер динамического перехода, также зависит от угла δ

$$t_{\text{ОАПВ}} = t_{\text{ОАПВ}}(\delta) \quad (4.35)$$

Другими словами, длительность искомой паузы ОАПВ $t_{\text{ОАПВ}}$ и угол δ являются взаимосвязанными параметрами, совместный анализ которых позволяет найти зависимость ВТД от максимального угла и соответственно искомую паузу ОАПВ.

Предлагаемый в данной работе подход совместного анализа динамической устойчивости отправной станции и режима на линии в паузу ОАПВ представляет алгоритм, состоящий из следующих стадий.

1. На 1-ой стадии рассчитывается динамическая устойчивость отправной станции при минимально возможной паузе ОАПВ $t_{\text{ОАПВ min}} = 0,5 \text{ сек}$.

2. При сохранении динамической устойчивости на 2-ой стадии находится диапазон изменения угла $\delta(t_{\text{ОАПВ min}}) = \delta_0 - \delta_{\text{max}}$.

При нарушении динамической устойчивости намечаются меры по сохранению устойчивости и расчет повторяется с 1-ой стадии.

3. На 3-ей стадии рассчитывается режим на линии в паузу ОАПВ и находится время, необходимое для успешного гашения ВТД. Если

$$\max t_{\text{ОАПВ}}(\delta_0, \delta_{\text{max}}) = 0,5 \text{ сек}, \quad (4.36)$$

то расчёт заканчивается.

4. Если

$$t_{\text{ОАПВнеобх}} = \max t_{\text{ОАПВ}}(\delta_0, \delta_{\text{max}}) > 0,5 \text{ сек} \quad (4.37)$$

то на стадии 4 рассчитывается динамическая устойчивость отправной станции при длительности паузы ОАПВ $t_{\text{ОАПВнеобх}}$, определенной на этапе 3.

5. На стадии 5 при устойчивом динамическом переходе расчет заканчивается.

При нарушении динамической устойчивости назначаются меры по сохранению устойчивости и расчеты повторяются с 1-ой стадии.

4.4 Исследование динамических переходов при ликвидации дуговых замыканий на линии в паузу однофазного автоматического повторного включения

Как вытекает из вышеприведённого, угловые характеристики для схем с УШР и с АШФ отличаются незначительно и соответственно динамические переходы в этих схемах будут иметь похожий вид. Поэтому ограничимся исследованием динамических переходов применительно к схеме с УШР (Рисунок 4.14).

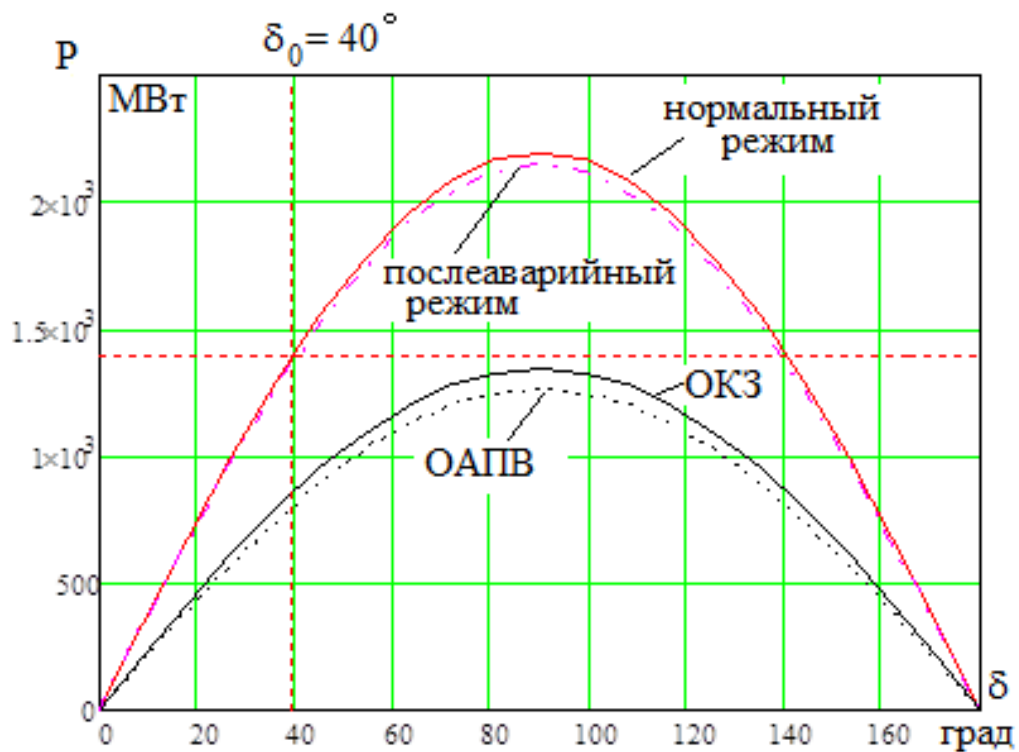


Рисунок 4.14 – Совокупность угловых характеристик при ликвидации аварии на $\Phi 0$ (вариант I)

Расчёт динамической устойчивости на основе (4.1) показал, что устойчивость нарушается. Полагая, что в качестве отправной станции используется ГЭС, в качестве меры по обеспечению устойчивости рассмотрим подключение тормозной установки мощностью 125 МВт на шинах станции. На рисунке 4.15 показан соответствующий динамический переход. Максимальный угол отклонения в

режиме ОАПВ составил $\delta_{\max} = 105^\circ$. В главе 3 условия гашения дуги определялись исходя из ориентировочного соотношения

$$\delta_{\max} = (2,0 - 2,5)\delta_0, \quad (4.38)$$

которое обычно имеет место при динамических переходах.

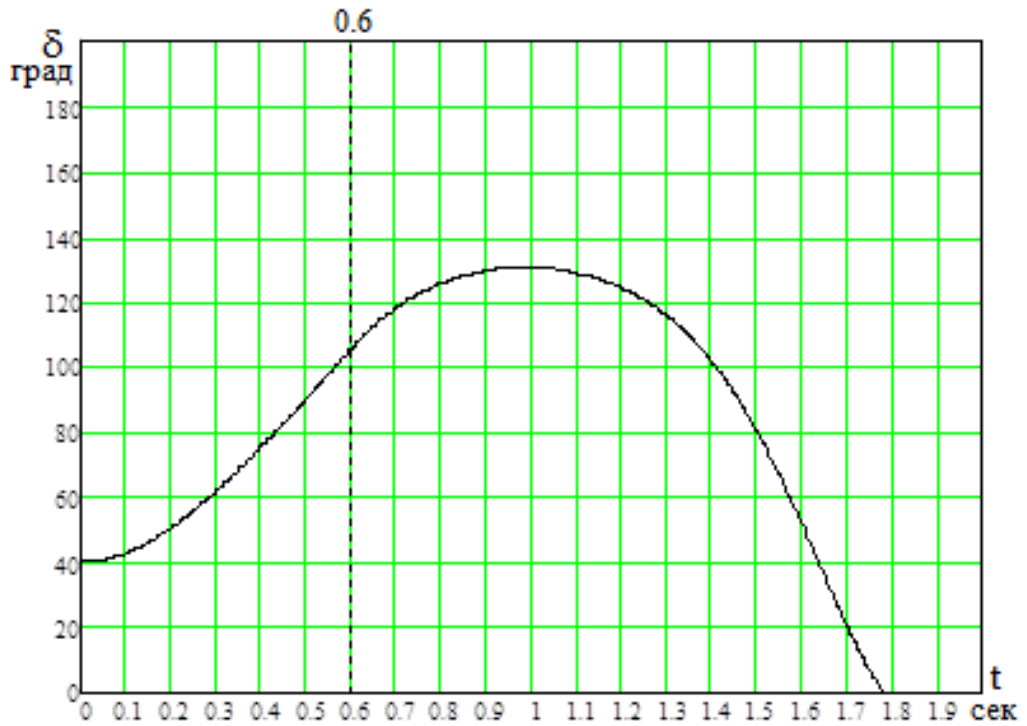
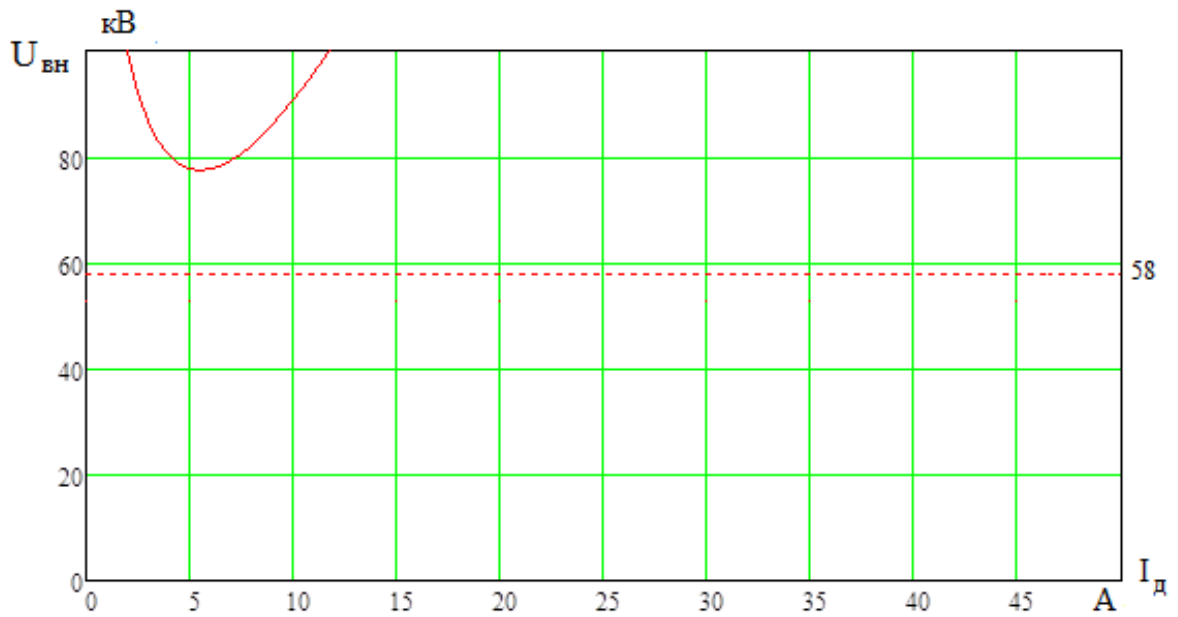
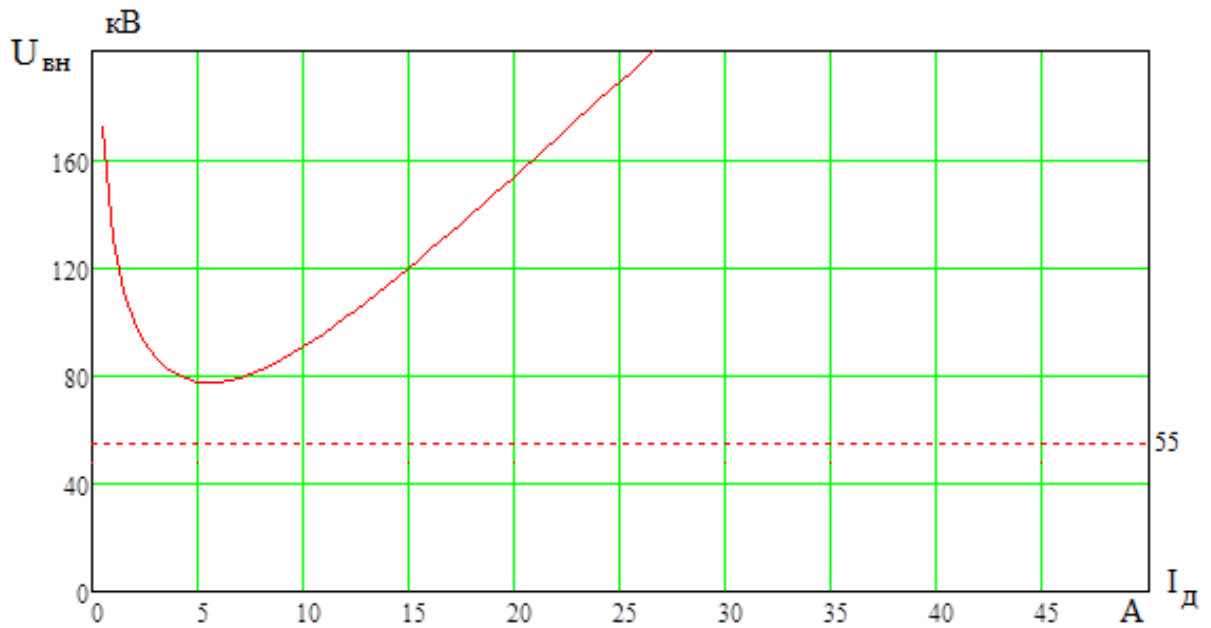


Рисунок 4.15 – Динамический переход при аварии на Ф0 при использовании тормозной установки (вариант I)

Условия для гашения ВТД при уточнённом (увеличенном) угле отклонения при ОАПВ на Ф0 оказываются благоприятными для успешного ОАПВ длительностью паузы, равной 0,5 сек (Рисунок 4.16).



а)



б)

Рисунок 4.16 – Определение условий для гашения ВТД при уточнённом угле отклонения (ОАПВ на Φ_0): авария на отправном конце линии (а); авария на приемном конце линии (б)

На рисунок 4.17 приведена совокупность угловых характеристик при ликвидации аварии на ПФ2 для варианта I. Следует отметить, что в режиме паузы

ОАПВ максимум угловой характеристики заметно превосходит мощность турбины.

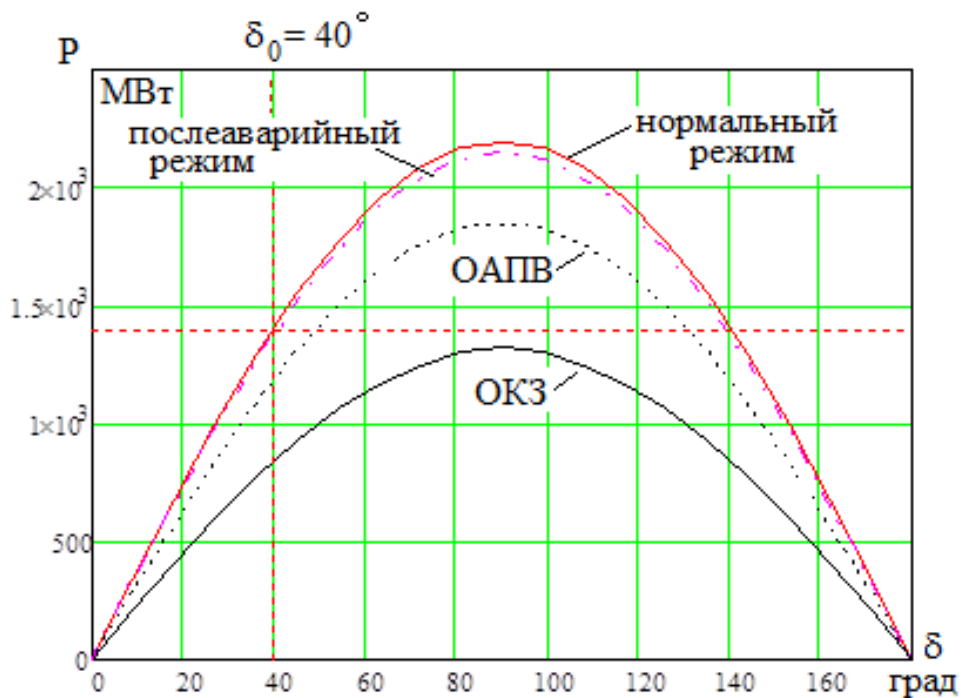


Рисунок 4.17 – Совокупность угловых характеристик при ликвидации аварии на ПФ2 (вариант I)

Расчёт динамической устойчивости на основе (4.1) показал, что устойчивость сохраняется. На рисунок 4.18 показан соответствующий динамический переход. Максимальный угол отклонения в режиме ОАПВ составил $\delta_{\max} = 63^\circ$. Условия для гашения ВТД при уточнённом (уменьшенном) угле отклонения при ОАПВ на ПФ2 оказываются более благоприятными для успешного ОАПВ длительностью паузы, равной 0,5 сек.

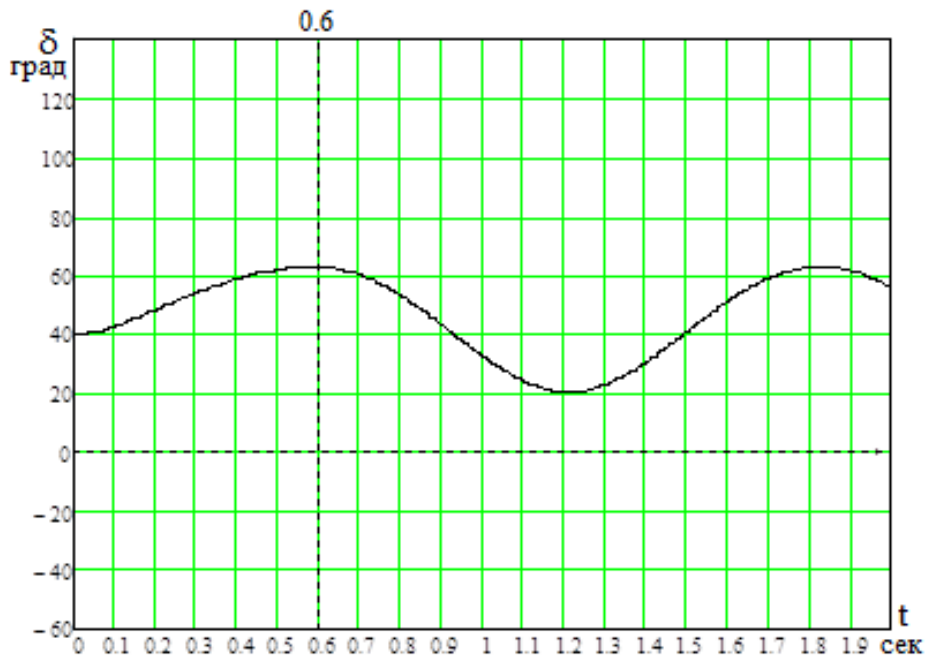


Рисунок 4.18 – Динамический переход при аварии на ПФ2 (вариант I)

Рассмотрим далее особенности динамических переходов для варианта II. При аварии на фазе Φ_0 динамическая устойчивость нарушается. При подключении тормозной установки мощностью 500 МВт на шинах станции устойчивость будет сохраняться. На рисунок 4.19 приведена совокупность угловых характеристик для этого случая.

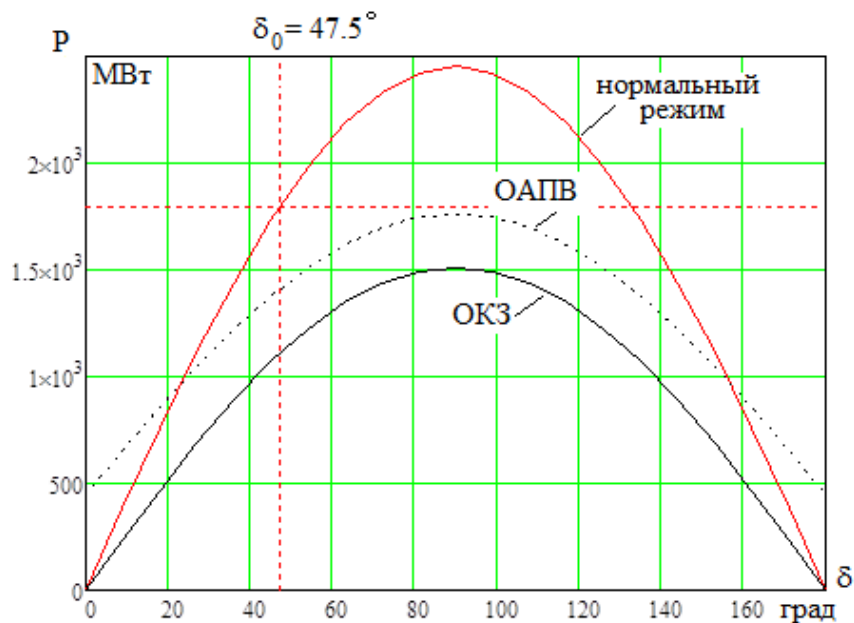
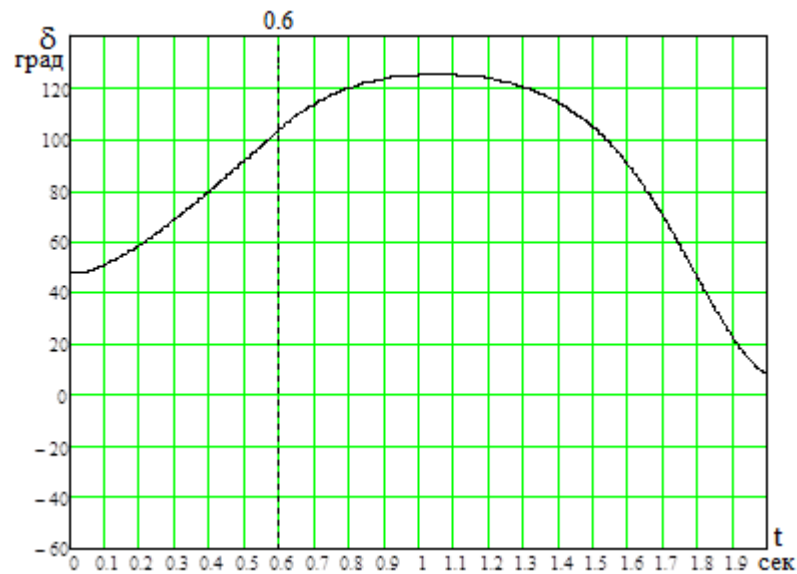


Рисунок 4.19 – Совокупность угловых характеристик при ликвидации аварии на Φ_0 (вариант II)

На рисунке 4.20 показан соответствующий динамический переход. Максимальный угол отклонения в режиме ОАПВ составил $\delta_{\max} = 104^\circ$. Условия для гашения ВТД при уточнённом (увеличенном) угле отклонения при ОАПВ на $\Phi 0$ остаются благоприятными для успешного ОАПВ длительностью паузы, равной 0,5 сек.



Рисунке 4.20 Динамический переход при аварии на $\Phi 0$ (вариант II)

Ликвидация аварии на полуфазе ПФ2 для варианта II не требует мер по сохранению устойчивости, и на рисунке 4.21 показан соответствующий динамический переход.

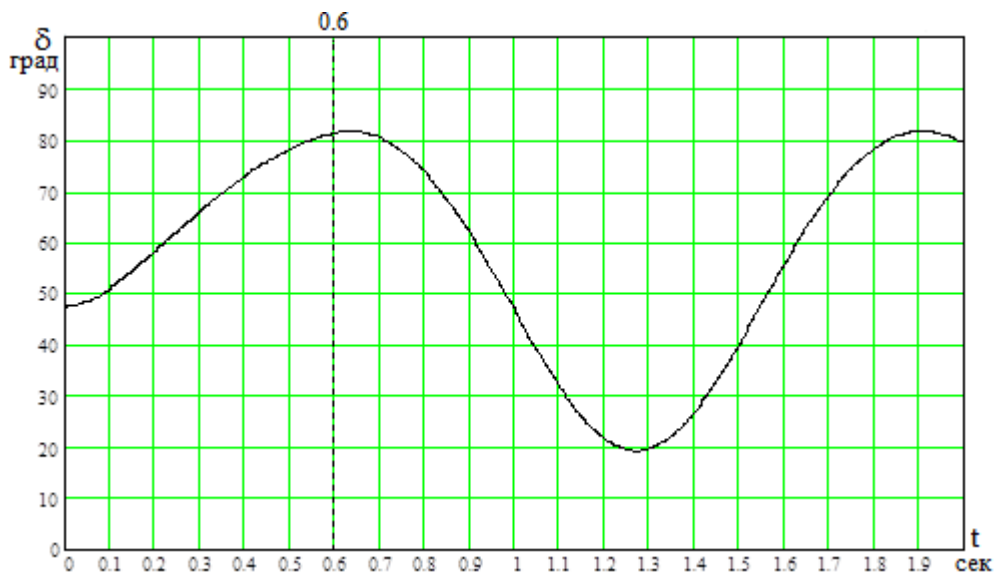


Рисунок 4.21 – Динамический переход при аварии на ПФ2 (вариант II)

Максимальный угол отклонения в режиме ОАПВ составил $\delta_{\max} = 82^\circ$. Условия для гашения ВТД при уточнённом (уменьшенном) угле отклонения при ОАПВ на ПФ2 оказываются более благоприятными для успешного ОАПВ длительностью паузы, равной 0,5 сек.

Выводы по главе 4

1. Проанализирован характер динамических переходов с учётом угловых характеристик в режимах ОКЗ, ОАПВ и аварийном режиме и определены максимальные углы отклонения δ , определяющие максимальные токи вторичной дуги.

2. Предложена методика для совместного анализа динамической устойчивости отправной станции и режима на линии в паузу ОАПВ, которая позволяет определить зависимость токов дуги подпитки от максимального угла δ и таким образом искомую длительность паузы ОАПВ.

ГЛАВА 5 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АДАПТИВНОГО ОДНОФАЗНОГО АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОВТОРНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ ЧЕТЫРЁХПРОВОДНОЙ ТРЁХФАЗНОЙ ЛИНИИ

5.1 Общие положения

Отключение линии сильно влияет на режим работу энергосистемы не только с экономической точки зрения, но и с точки зрения надежности. Следовательно, использование однофазного автоматического повторного включения (ОАПВ) в линиях сверхвысокого напряжения является эффективной мерой для повышения надежности. После отключения линий, устройство автоматического повторного включения (АПВ) выдавая сигнал на включение выключателя, через некоторое время, называемое бестоковой паузой, включает ДЭП.

Бестоковая пауза ОАПВ выбирается из условий гашения вторичной дуги подпитки. Для гашения вторичной дуги подпитки существенны размер дугового промежутка и его расположение.

Устройство в составе автоматики ОАПВ по управлению бестоковой паузой и формирующее выдержку времени паузы ОАПВ в соответствии с реальным временем горения дуги подпитки называется адаптивное ОАПВ.

В настоящее время исследователями предлагаются различные варианты осуществления адаптивного ОАПВ [61–66]. Так, например, в [61] рассматривается новая схема, использующая дифференциальный ток между расчетным током, основанным на модели переходного КЗ, и фактическим измеренным током от фазы КЗ шунтирующего реактора. Согласно результатам моделирования, предложенный в работе алгоритм может правильно и надежно идентифицировать устойчивое повреждение.

В [62] анализируется характеристика восстанавливающегося напряжения при однофазном замыкании на землю в линии электропередачи сверхвысокого напряжения с шунтирующим реактором. Авторами предлагается новый метод, основанный на спектре мощности назначениям которого является идентификация

устойчивых и неустойчивых аварий. Для повышения адаптивности предлагается новая схема АПВ, применяемая к параллельным линиям электропередачи с шунтирующими реакторами [65].

В отечественной литературе [34] используется контроль напряжения аварийной фазы для установления момента погасания дуги.

При анализе и сравнении существующих способов адаптивного ОАПВ замечены некоторые слабые стороны, что могут привести к снижению надёжности. Автором в соавторстве предложен усовершенствованный способ АОАПВ.

Отличительные особенности предлагаемого способа осуществления АОАПВ состоит в том, что не имеет сложной функциональности и низкую степень надёжности при идентификации не устранившихся ОКЗ.

5.2 Обоснование способа усовершенствования адаптивного однофазного автоматического повторного включения

Поставленная задача достигается тем, что в данном способе путём предварительных расчётов определяют на линии две зоны, примыкающие к отправной станции и приёмной системе, и осуществляют кратковременное одностороннее включение аварийной фазы со стороны отправной станции, если ОКЗ обнаружено во второй зоне, примыкающей к приёмной системе, и соответственно одностороннее включение аварийной фазы происходит со стороны приёмной системы, если ОКЗ обнаружено в первой зоне, примыкающей к отправной станции. Далее измеряют действующее значение тока аварийной фазы на включенном конце и сравнивают с заданной уставкой. Если ток выше уставки, то на фазе фиксируют короткое или дуговое замыкание и далее дают команду на отключение.

На рисунке 5.1 приведена структурная схема, реализующая предлагаемый способ для определения тока ОКЗ со стороны отправной станции при ОКЗ на расстоянии x при разомкнутой аварийной фазе или полуфазе со стороны приёмной системы.

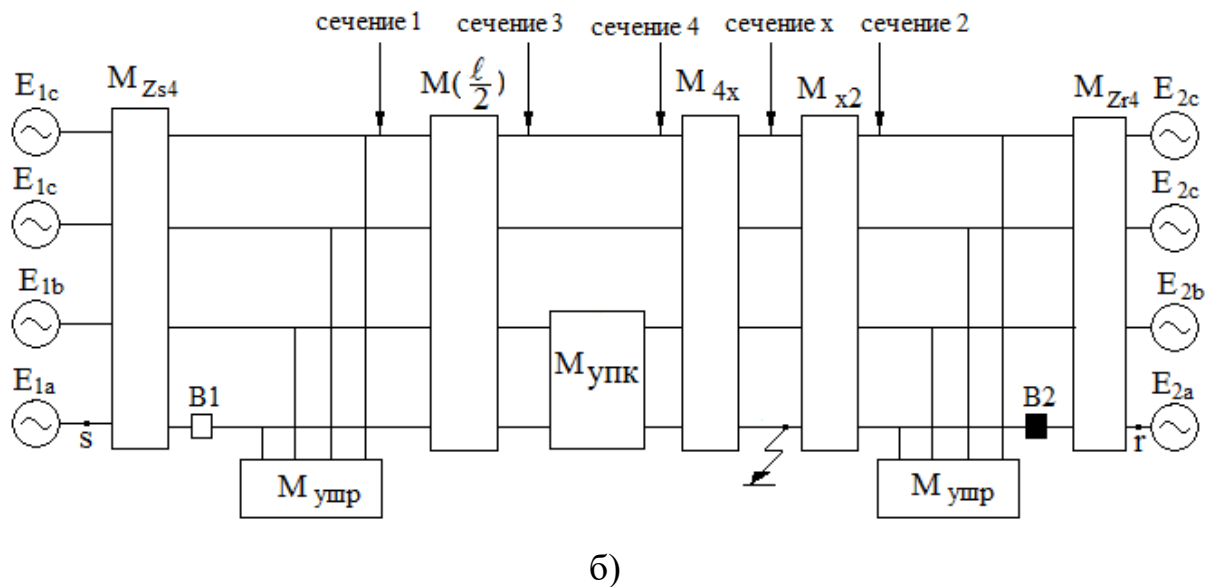
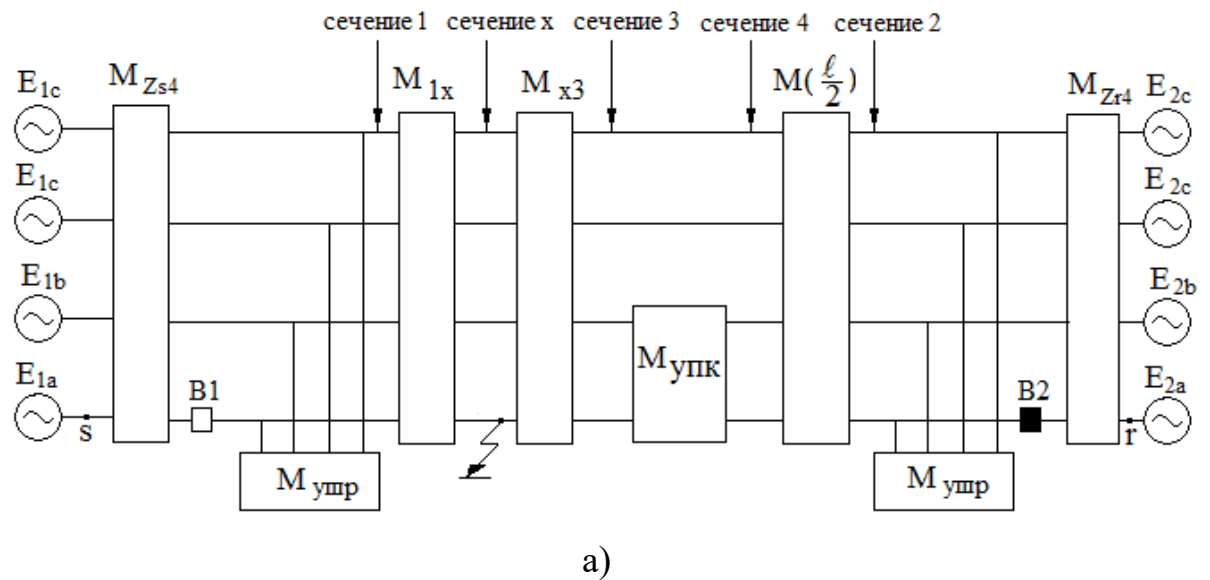


Рисунок 5.1 – Расчётные схемы с УШР для определения тока ОКЗ со стороны отправной станции при ОКЗ на расстоянии x при разомкнутой аварийной фазе или полуфазе со стороны приёмной системы: ОКЗ на участке 1-3 (а); ОКЗ на участке 4-2 (б)

Ниже приводятся соответствующие этим схемам алгоритмы для расчёта тока ОКЗ, воздействующего на отправную станцию.

Алгоритм для схемы на рисунке 5.1а:

Полная фазная матрица всей схемы при аварии в сечении 1-3 имеет вид

$$\mathbf{M}_{SR13}(x) = \mathbf{M}_{Zs4} \cdot \mathbf{M}_{ушр} \cdot \mathbf{M}_{1x(x)} \cdot \mathbf{M}_{\Pi} \cdot \mathbf{M}_{x3(x)} \cdot \mathbf{M}_{упк} \cdot \mathbf{M}(\frac{\ell}{2}) \cdot \mathbf{M}_{ушр} \cdot \mathbf{M}_{\kappa} \cdot \mathbf{M}_{Zr4} \quad (5.1)$$

Далее определяются соответствующие подматрицы этой полной матрицы

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{sr13}(x) &= \text{submatrix}(\mathbf{M}_{sr13}(x), 0, 3, 0, 3), \\ \mathbf{B}_{sr13}(x) &= \text{submatrix}(\mathbf{M}_{sr13}(x), 0, 3, 4, 7), \\ \mathbf{C}_{sr13}(x) &= \text{submatrix}(\mathbf{M}_{sr13}(x), 0, 3, 4, 7), \\ \mathbf{D}_{sr13}(x) &= \text{submatrix}(\mathbf{M}_{sr13}(x), 4, 7, 4, 7). \end{aligned} \quad (5.2)$$

Ниже определяется вектор-столбец фазных и полуфазных токов в конце схемы

$$\mathbf{I}_r(x, \delta) = \mathbf{B}_{sr13}(x)^{-1} (\mathbf{E}_{1\phi}(\delta) - \mathbf{A}_{sr13}(x) \mathbf{E}_{2\phi}) \quad (5.3)$$

Далее находится вектор-столбец фазных и полуфазных токов в начале линии

$$\mathbf{I}_{10k313}(x, \delta) = \mathbf{C}_{sr13}(x) \mathbf{E}_{2\phi} + \mathbf{D}_{sr13}(x) \mathbf{I}_r(x, \delta) \quad (5.4)$$

В зависимости от аварийной фазы или полуфазы соответствующая строка этого вектор - столбца определяет искомый ток ОКЗ $\mathbf{I}_{10k313}(x, \delta)$ со стороны отправной станции при аварии на участке 1-3.

Алгоритм для схемы на рис.5.16:

Полная фазная матрица всей схемы имеет вид

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_{sr42}(x) &= \mathbf{M}Zs4 \cdot \mathbf{M}_{yup} \cdot \mathbf{M}(\ell/2) \cdot \mathbf{M}_{ynk} \cdot \mathbf{M}4x(x) \cdot \\ &\cdot \mathbf{M}_{ll} \cdot \mathbf{M}x2(x) \cdot \mathbf{M}_{yup} \cdot \mathbf{M}_k \cdot \mathbf{M}Zr4 \end{aligned} \quad (5.5)$$

Далее определяются соответствующие подматрицы этой полной матрицы

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{sr42}(x) &= \text{submatrix}(\mathbf{M}_{sr42}(x), 0, 3, 0, 3), \\ \mathbf{B}_{sr42}(x) &= \text{submatrix}(\mathbf{M}_{sr42}(x), 0, 3, 4, 7), \\ \mathbf{C}_{sr42}(x) &= \text{submatrix}(\mathbf{M}_{sr42}(x), 0, 3, 4, 7), \\ \mathbf{D}_{sr42}(x) &= \text{submatrix}(\mathbf{M}_{sr42}(x), 4, 7, 4, 7). \end{aligned} \quad (5.6)$$

Ниже определяется вектор-столбец фазных и полуфазных токов в конце схемы

$$\mathbf{I}_r(x, \delta) = \mathbf{B}_{sr42}(x)^{-1} (\mathbf{E}_{1\phi}(\delta) - \mathbf{A}_{sr42}(x) \mathbf{E}_{2\phi}) \quad (5.7)$$

Далее находится вектор-столбец фазных и полуфазных токов в начале линии

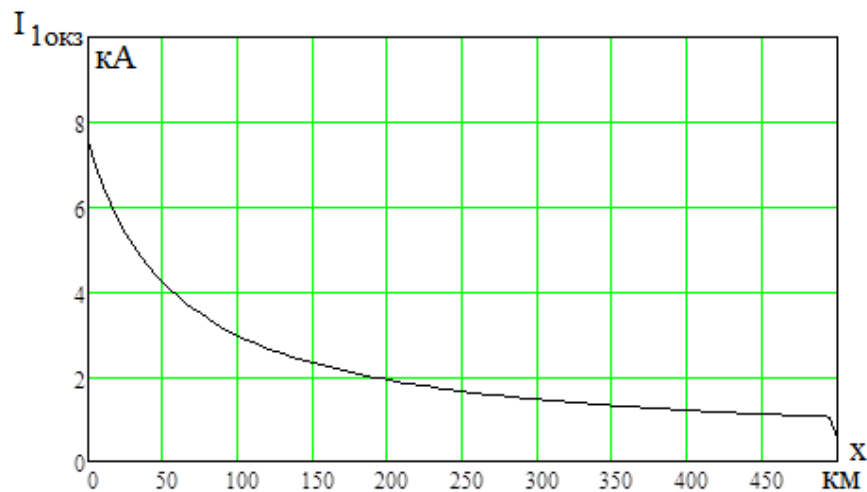
$$\mathbf{I}_{10k342}(x, \delta) = \mathbf{C}_{sr42}(x) \mathbf{E}_{2\phi} + \mathbf{D}_{sr42}(x) \mathbf{I}_r(x, \delta) \quad (5.8)$$

В зависимости от аварийной фазы или полуфазы соответствующая строка этого вектор - столбца определяет искомый ток ОКЗ $I_{1OK342}(x, \delta)$ со стороны отправной станции при аварии на участке 2-4.

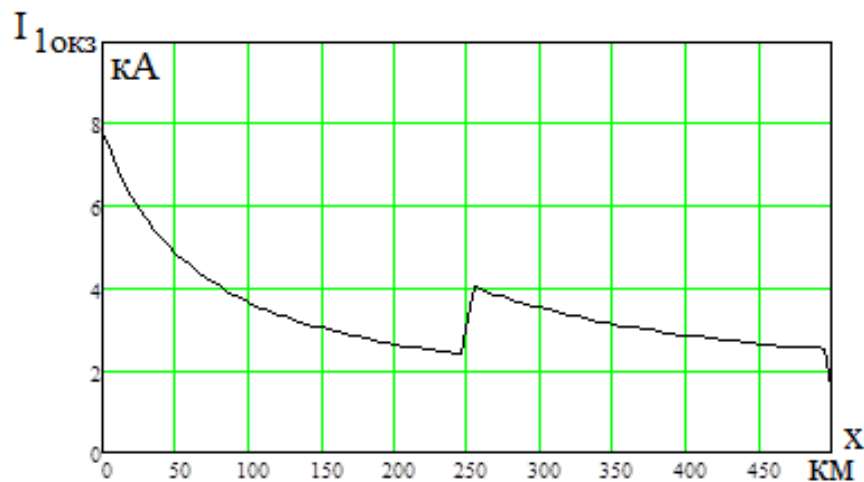
Кривая тока ОКЗ на всём протяжении линии с использованием функции Хевисайда найдётся

$$I_{1OK3}(x, \delta) = \Phi\left(x - \frac{L}{2}\right) I_{1OK313}(x, \delta) + (\Phi(L - x) - \Phi\left(x - \frac{L}{2}\right)) I_{1OK342}(x, \delta) \quad (5.9)$$

На рисунке 5.2 приведены кривые токов ОКЗ, воздействующих на отправную станцию, в зависимости от места аварии на полуфазе ПФ2 и фазе ФО.



а)



б)

Рисунка 5.2 – Зависимость токов ОКЗ, воздействующих на отправную станцию, от места аварии на линии: а - авария на полуфазе ПФ2; б - авария на фазе ФО

Приведенные на рисунке 5.2 зависимости аварийных токов, воздействующих на отправную станцию, от места аварии на линии при одностороннем включении аварийной фазы со стороны отправной станции, определены для схемы напряжением 500 кВ со следующими параметрами: длина линии 500 км, сопротивление отправной станции: $X_1=50$ Ом, $X_{10}=30$ Ом, сопротивление приемной системы $X_2=5$ Ом, $X_{20}=0$ Ом. Заметим, чтобы исключить бесконечно большие токи со стороны приёмной системы шины бесконечной мощности, принимаемые при расчетах ОАПВ и динамической устойчивости, заменены системой большой мощности и в дальнейших расчётах.

Расчётные схемы с УШР для определения тока ОКЗ со стороны приёмной системы при ОКЗ на расстоянии x при разомкнутой аварийной фазе или полуфазе со стороны отправной станции отличаются лишь состоянием выключателей по концам линии.

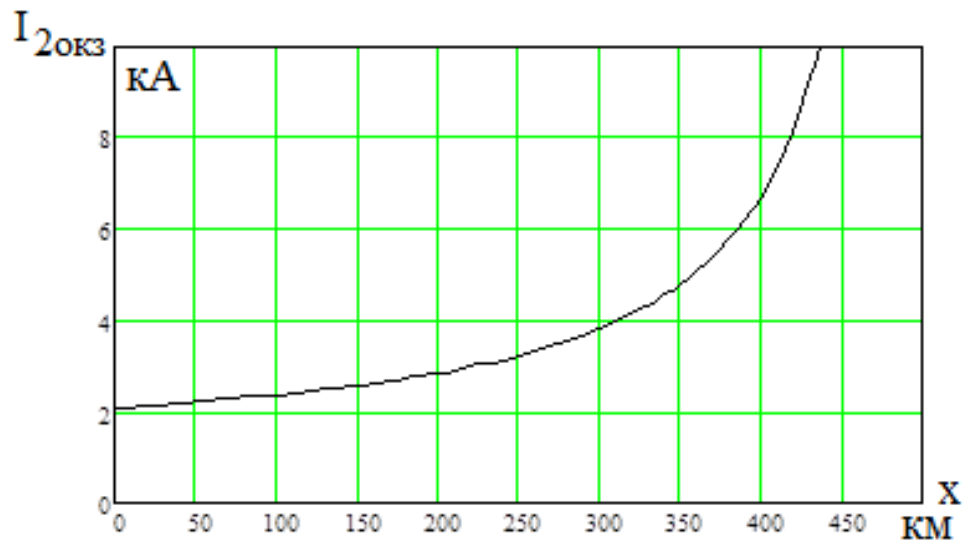
Алгоритм для определения токов ОКЗ, воздействующих на приемную систему, в зависимости от места аварии на линии составляется подобным образом, как это было сделано выше для токов ОКЗ, воздействующих на отправную станцию.

Окончательное выражение зависимость токов ОКЗ, воздействующих на приемную систему, запишется

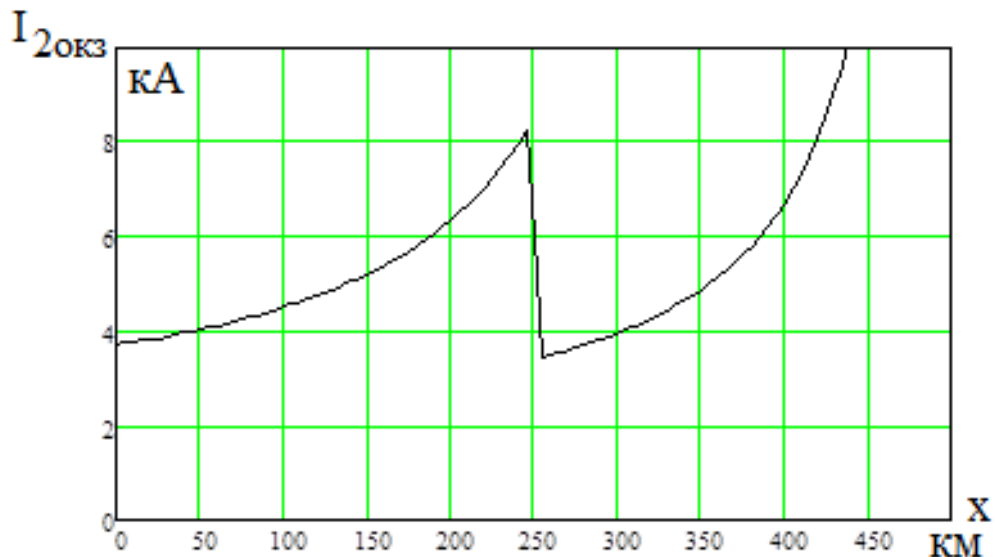
$$I_{2OKЗ}(x, \delta) = \Phi\left(x - \frac{L}{2}\right) I_{2OKЗ13}(x, \delta) + (\Phi(L - x) - \Phi\left(x - \frac{L}{2}\right)) I_{2OKЗ42}(x, \delta) \quad (5.10)$$

Как уже отмечалось выше, в зависимости от аварийной фазы или полуфазы соответствующая строка этого вектор - столбца определяет искомый ток ОКЗ $I_{2OKЗ}(x, \delta)$ со стороны приёмной системы при аварии на всём протяжении линии.

На рисунке 5.3 показаны кривые токов ОКЗ, воздействующих на приемную систему, в зависимости от места аварии на полуфазе ПФ2 и фазе ФО.



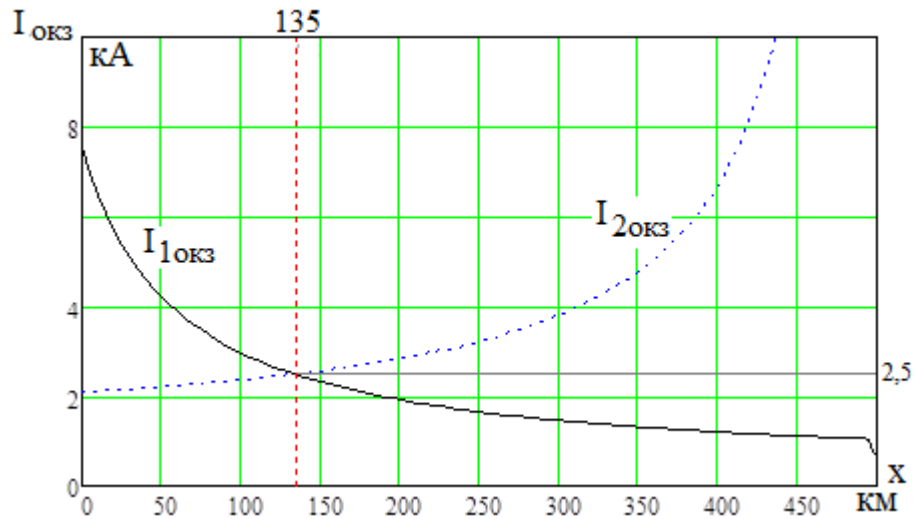
а)



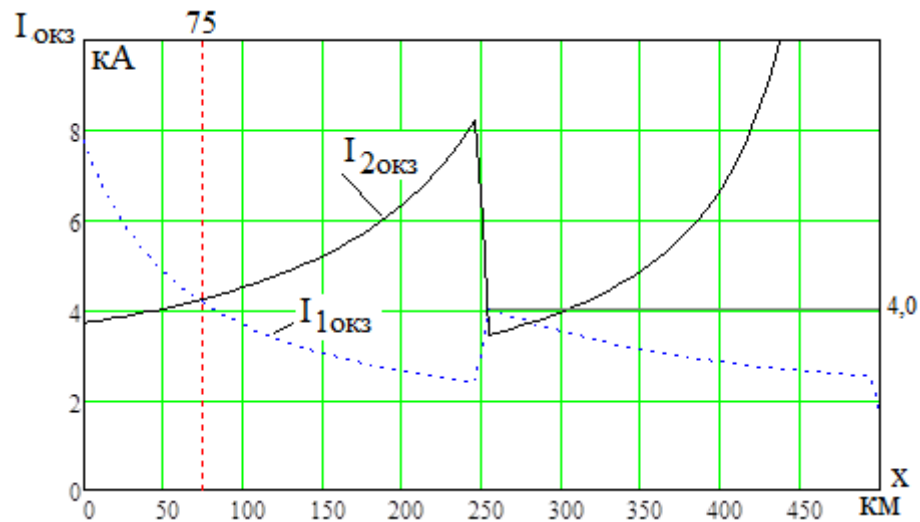
б)

Рисунок 5.3 – Зависимость токов ОКЗ, воздействующих на приёмную систему, от места аварии на линии:
авария на полуфазе ПФ2 (а); авария на фазе ФО (б)

Совместив кривые на рисунке 5.2а и 5.3а и соответственно на рисунке 5.2б и 5.3б, найдём зоны, которые определяют, с какой стороны следует производить односторонне включение аварийной фазы (Рисунок 5.4).



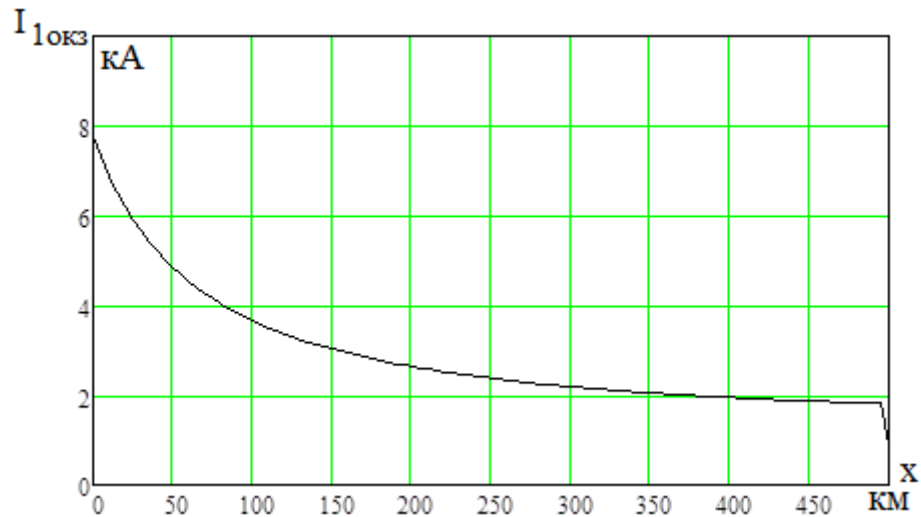
а)



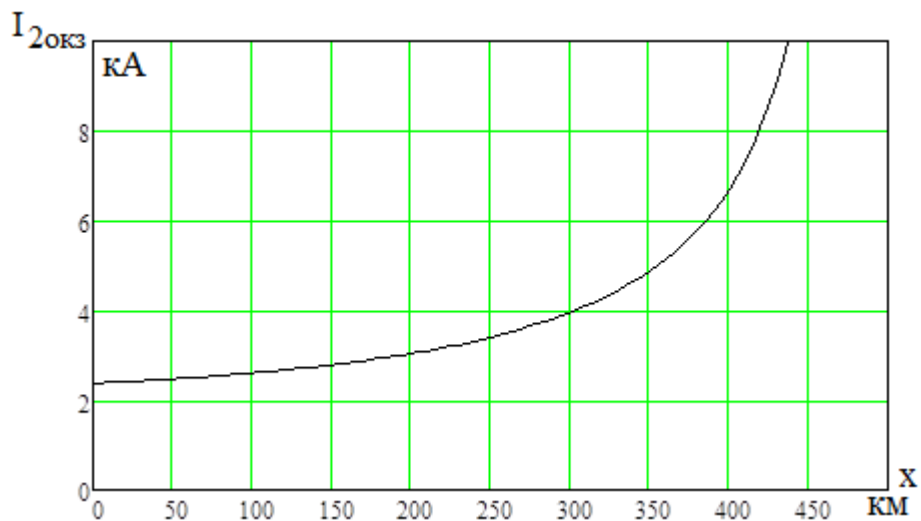
б)

Рисунок 5.4 – Зоны, определяющие с какой стороны следует производить одностороннее включение аварийной фазы: авария на полуфазе ПФ2 (а); авария на фазе Ф0 (б)

Как это видно на рисунке 5.4а, максимальный ток, воздействующий на отправную станцию и приемную систему при аварии на ПФ2, не превышает 2,5 кА. Согласно рисунку 5.4б максимальный ток, воздействующий на отправную станцию и приемную систему при аварии на Ф0, достигает 4,0 кА. Объясняется такое увеличение тока влиянием УПК, которая включена в фазу Ф0. Для снижения воздействующего тока на отправную станцию и приемную систему при аварии на Ф0 целесообразно перед включением этой фазы зашунтировать УПК (Рисунок 5.5).



а)



б)

Рисунок 5.5 – Зависимость воздействующих токов ОКЗ от места аварии на Φ_0 при зашунтированной УПК: ОКЗ со стороны отправной станции (а); б - ОКЗ со стороны приёмной системы (б)

Совместив кривые на рисунке 5.5а и 5.5б, найдём зоны, которые определяют, с какой стороны следует производить односторонне включение аварийной фазы Φ_0 при зашунтированной УПК (Рисунок 5.6).

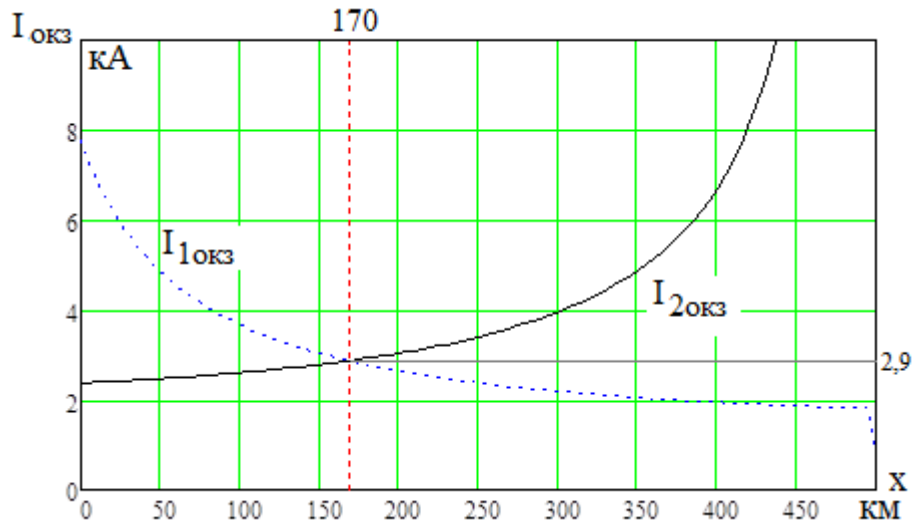


Рисунок 5.6 – Зоны, определяющие с какой стороны следует производить одностороннее включение аварийной фазы Ф0 при зашунтированной УПК

Благодаря шунтированию УПК максимальный ток ОКЗ, воздействующий на отправную станцию и приемную систему при аварии на Ф0, снижается с 4,0 кА до 2,9 кА.

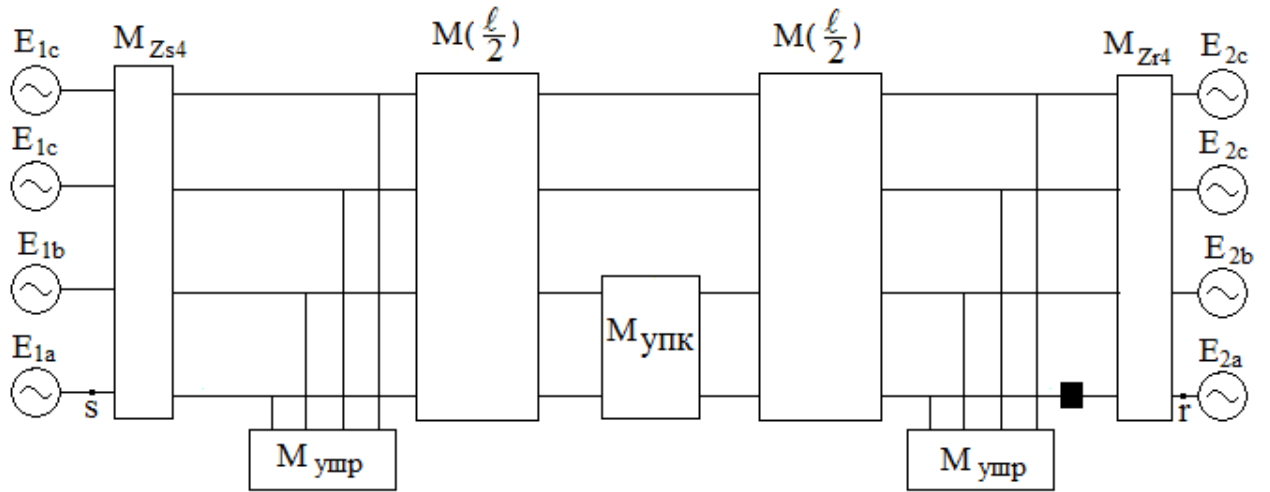
5.3 Выбор уставок для надёжной идентификации повреждения

Уставка по току отстраивается от наибольшего тока при одностороннем включении фазы или полуфазы

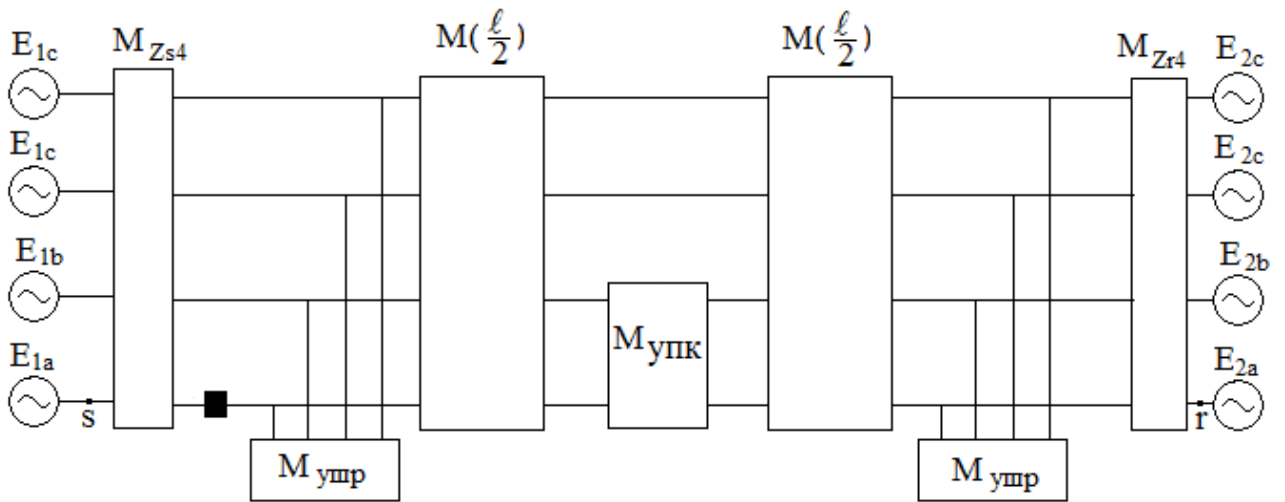
$$I_{уст} \geq I_{max} \cdot K_H \cdot K_{\text{ч}} \quad (5.11)$$

где $K_H=1,1$ – коэффициент надежности, $K_{\text{ч}}=1,25$ – коэффициент чувствительности

Ток, определяющий уставку, находится путём расчетов в схемах, изображенных на рисунке 5.7.



а)



б)

Рисунок 5.7 Успешное одностороннее включение фазы или полуфазы: включение со стороны отправной станции (а); включение со стороны приёмной системы (б)

Алгоритм для определения максимального тока, протекающего в отправной станции при одностороннем включении соответствующей фазы или полуфазы линии, представлен ниже.

Полная фазная матрица всей схемы имеет вид

$$\mathbf{M}_{srycn} = \mathbf{M}_{Zs4} \cdot \mathbf{M}_{ушр} \cdot \mathbf{M}(\frac{\ell}{2}) \cdot \mathbf{M}_{ушр} \cdot \mathbf{M}(\frac{\ell}{2}) \cdot \mathbf{M}_{ушр} \cdot \mathbf{M}_K \cdot \mathbf{M}_{Zr4} \quad (5.12)$$

Далее определяются соответствующие подматрицы этой полной матрицы

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{srycn} &= \text{submatrix}(\mathbf{M}_{srycn}, 0, 3, 0, 3), \\ \mathbf{B}_{srycn} &= \text{submatrix}(\mathbf{M}_{srycn}, 0, 3, 4, 7), \\ \mathbf{C}_{srycn} &= \text{submatrix}(\mathbf{M}_{srycn}, 0, 3, 4, 7), \\ \mathbf{D}_{srycn} &= \text{submatrix}(\mathbf{M}_{srycn}, 4, 7, 4, 7). \end{aligned} \quad (5.13)$$

Ниже определяется вектор-столбец фазных и полуфазных токов в конце схемы

$$\mathbf{I}_{rycn}(\delta) = \mathbf{B}_{srycn}^{-1}(\mathbf{E}_{1\phi}(\delta) - \mathbf{A}_{srycn}\mathbf{E}_{2\phi}) \quad (5.14)$$

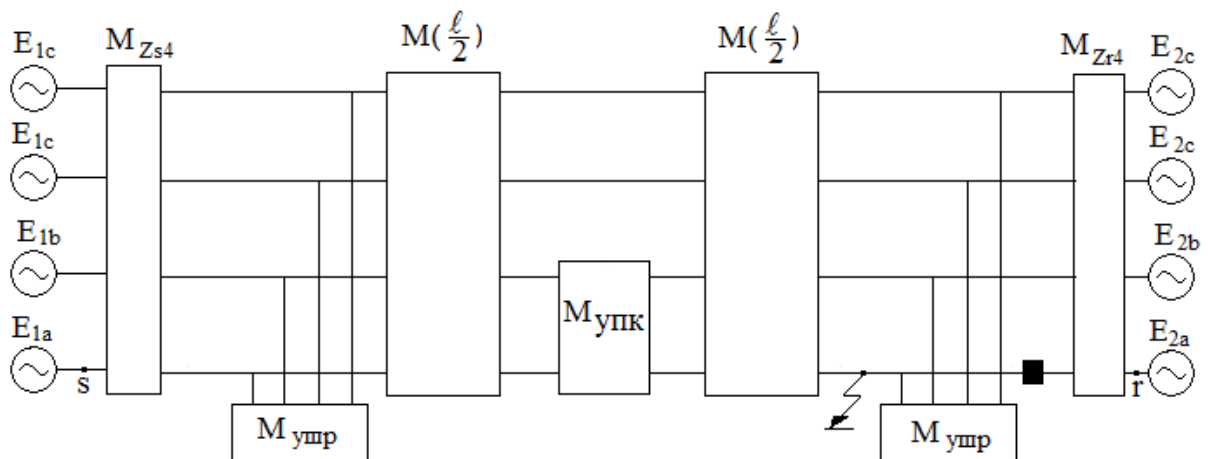
Далее находится вектор-столбец фазных и полуфазных токов в начале линии

$$\mathbf{I}_{1ycn}(\delta) = \mathbf{C}_{srycn}\mathbf{E}_{2\phi} + \mathbf{D}_{srycn}\mathbf{I}_{rycn}(\delta) \quad (5.15)$$

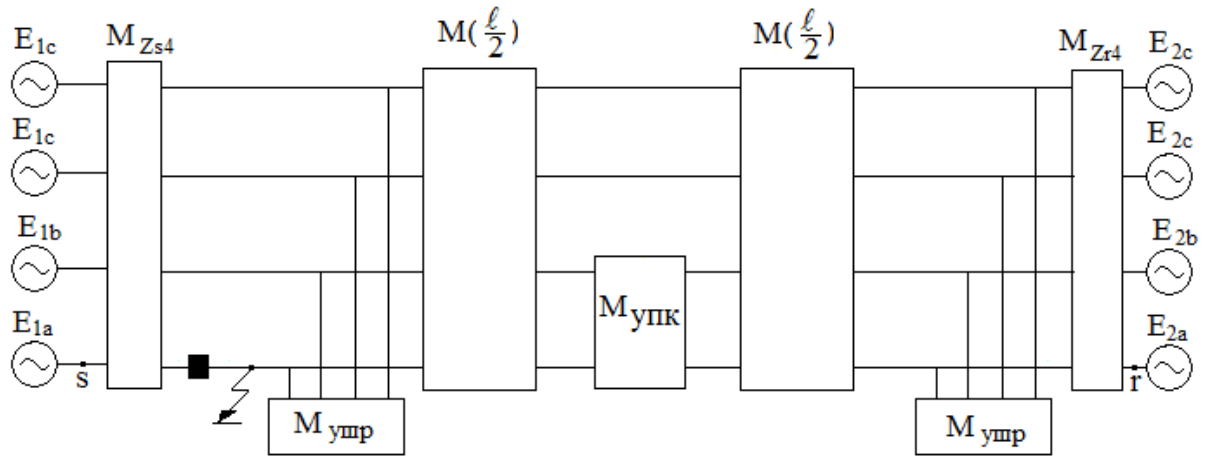
В зависимости от аварийной фазы или полуфазы соответствующая строка этого вектор - столбца определяет искомым ток ОКЗ $\mathbf{I}_{1ycn}(\delta)$ со стороны отправной станции при успешном одностороннем включении.

Аналогично определяется алгоритм для расчёта максимального тока, протекающего в приемной системе при одностороннем включении соответствующей фазы или полуфазы линии со стороны приемной системы.

Токи, воздействующие на отправную станцию и приёмную систему при неуспешных включениях, находятся путём расчетов в схемах, изображенных на рисунке 5.8.



а)



б)

Рисунок 5.8 – Неуспешное одностороннее включение фазы или полуфазы: включение со стороны отправной станции (а); включение со стороны приёмной системы (б)

При неуспешном одностороннем включении возможно по концам аварийной фазы или полуфазы металлическое или дуговое замыкание. Как показал анализ, при неуспешном включении сопротивление дуги мало и близко к принятому металлическому сопротивлению и не оказывает заметного влияния на определение границы зон, а также на токи, воздействующие на примыкающие отправную станцию и приёмную систему при неуспешном одностороннем включении аварийной фазы или полуфазы.

Алгоритм для определения тока, протекающего в отправной станции при неуспешном одностороннем включении соответствующей фазы или полуфазы линии, представлен ниже.

Полная фазная матрица всей схемы имеет вид

$$\mathbf{M}_{srneycn} = \mathbf{M}_{Zs4} \cdot \mathbf{M}_{ушр} \cdot \mathbf{M}(\frac{\ell}{2}) \cdot \mathbf{M}_{упк} \cdot \mathbf{M}(\frac{\ell}{2}) \cdot \mathbf{M}_{ушр} \cdot \mathbf{M}_n \cdot \mathbf{M}_k \cdot \mathbf{M}_{Zr4} \quad (5.16)$$

Далее определяются соответствующие подматрицы этой полной матрицы

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{srneycn} &= \text{submatrix}(\mathbf{M}_{srneycn}, 0, 3, 0, 3), \\ \mathbf{B}_{srneycn} &= \text{submatrix}(\mathbf{M}_{srneycn}, 0, 3, 4, 7), \\ \mathbf{C}_{srneycn} &= \text{submatrix}(\mathbf{M}_{srneycn}, 0, 3, 4, 7), \\ \mathbf{D}_{srneycn} &= \text{submatrix}(\mathbf{M}_{srneycn}, 4, 7, 4, 7). \end{aligned} \quad (5.17)$$

Ниже определяется вектор-столбец фазных и полуфазных токов в конце схемы

$$\mathbf{I}_{rneycn}(\delta) = \mathbf{B}_{srneycn}^{-1}(\mathbf{E}_{1\phi}(\delta) - \mathbf{A}_{srneycn}\mathbf{E}_{2\phi}) \quad (5.18)$$

Далее находится вектор-столбец фазных и полуфазных токов в начале линии

$$\mathbf{I}_{1neycn}(\delta) = \mathbf{C}_{srneycn}\mathbf{E}_{2\phi} + \mathbf{D}_{srneycn}\mathbf{I}_{rneycn}(\delta) \quad (5.19)$$

В зависимости от аварийной фазы или полуфазы соответствующая строка этого вектор - столбца определяет искомый ток ОКЗ $\mathbf{I}_{1neycn}(\delta)$ со стороны отправной станции при неуспешном одностороннем включении.

Аналогичным алгоритмом определяется ток со стороны приемной системы.

В таблице 5.1 приведено сопоставление токов при успешном и неуспешном одностороннем включении.

Таблица 5.1 – Сопоставление токов при успешном и неуспешном одностороннем включении расчётной фазы или полуфазы

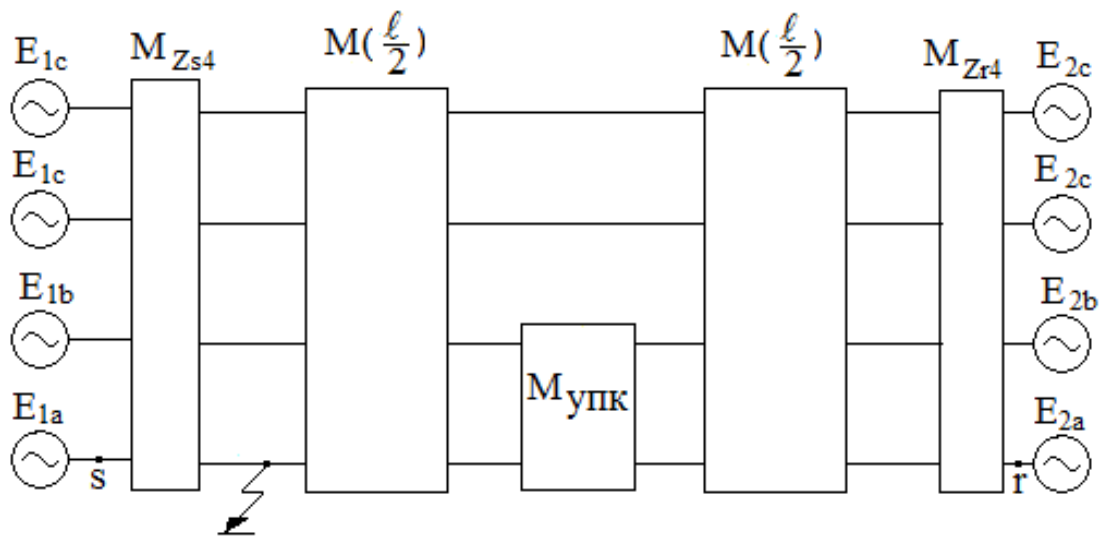
Расчётная фаза или полуфаза	Ф0		ПФ2	
	Отправная станция	Приемная система	Отправная станция	Приемная система
Токи при успешном одностороннем включении аварийной фазы (данные для уставки), А	44	43	20	28
Токи при неуспешном одностороннем включении аварийной фазы (данные для принятия решения), А	1750	2300	1100	2080

По данным таблицы 5.1 можно отметить, что для ВЛ напряжением 500 кВ и длиной 500 км значения токов при успешном одностороннем включении на обычных фазах составляет не более 50 А. При этом токи при неуспешном включении составляет 2300 А. Касательно полуфазам токи при успешном включении составляют не более 30 А, а при неуспешном - 1100 А. Токи при неуспешном включении превосходят уставку более чем в 40 раза. Такое соотношение свидетельствует о надежной идентификации повреждений.

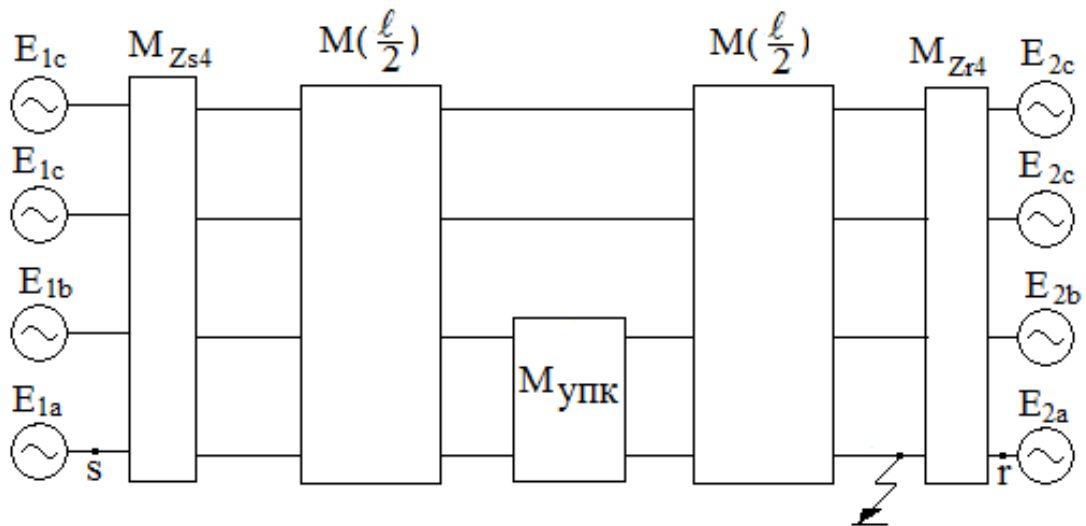
5.4 Сравнение токов однофазного короткого замыкания, воздействующих на отправную и приёмную системы в исходной схеме и при неуспешном одностороннем включении аварийной фазы при использовании адаптивного однофазного автоматического повторного включения

Как следует из рисунка 5.6 ток, воздействующий на отправную станцию при неуспешном одностороннем включении с её стороны фазы Φ_0 при использовании АОАПВ, находится в диапазоне 2,9 - 1,8 кА. Соответственно ток, воздействующий на приёмную систему при неуспешном одностороннем включении с её стороны фазы Φ_0 при использовании АОАПВ, находится в диапазоне 2,3 - 2,9 кА. Подобная картина имеет место и для полуфазы ПФ2.

Как следует из рисунка 5.4а ток, воздействующий на отправную станцию при неуспешном одностороннем включении с её стороны полуфазы ПФ2 при использовании АОАПВ, находится в диапазоне 1,05 - 2,5 кА. Соответственно ток, воздействующий на приёмную систему при неуспешном одностороннем включении с её стороны полуфазы ПФ2 при использовании АОАПВ, находится в диапазоне 2,1 - 2,5 кА.



a)



б)

Рисунок 5.9 – Исходная схема для оценки токов ОКЗ: для отправной станции(а);
для приёмной системы (б)

Приведённые токи существенно меньше токов, воздействующих на системы при первоначальном однофазном КЗ в исходной схеме на рисунке 5.9.

Действительно, как показывают расчеты, ток ОКЗ для отправной станции составляет для фазы Ф0 7,9 кА, а для полуфазы ПФ2 8,1 кА. Соответственно ток ОКЗ для приёмной системы составляет для фазы Ф0 и полуфазы ПФ2– 173 кА. Таким образом, предлагаемый способ АОАПВ не представляет опасности для оборудования в случае неуспешных односторонних включений.

Выводы по главе 5

1. Предложенный способ усовершенствования адаптивного АОАПВ позволяет надёжно идентифицировать однофазное короткое или дуговое замыкание в четырёхпроводных трёхфазных линиях сверхвысокого напряжения.

2. Токи, воздействующие на примыкающие системы при одностороннем включении при наличии на аварийной фазе однофазного короткого замыкания, в несколько раз меньше токов, возникающих в системах при первоначальном однофазном коротком замыкании в исходной схеме.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведён обзор проработанных в настоящее время ВЛ сверхвысокого напряжения, включая традиционные линии, компактные и сверхкомпактные ВЛ, ВЛ с резервной фазой, шестифазные линии, управляемые самокомпенсирующиеся ВЛ и четырёхфазные линии. Отмеченные недостатки перечисленных выше линий устранены в исследуемой в диссертации четырёхпроводной трёхфазной линии (линии с полуфазами).

2. Разработаны математическая модель четырёхпроводной трёхфазной линии и сопутствующих элементов и соответствующая программа в среде Mathcad для расчёта восстанавливающихся напряжений и вторичных токов дуги.

3. Доказана эффективность осуществления ОАПВ на базе управляемых шунтирующих реакторов, а также ОАПВ с автоматическим шунтированием аварийной фазы (полуфаза) для успешного гашения дуги в четырёхпроводных трёхфазных линиях.

4. Предложен алгоритм для совместного анализа динамической устойчивости и режима в линии с полуфазами в паузу ОАПВ, позволяющий найти зависимость вторичных токов дуги от максимальной величины угла δ и таким образом искомую длительность паузы ОАПВ.

5. Даны рекомендации, которые могут быть использованы при ликвидации неустойчивых однофазных отказов четырёхпроводных трёхфазных линий.

6. Предложен новый способ усовершенствования адаптивного ОАПВ, который позволяет надёжно идентифицировать однофазное короткое или дуговое замыкание в линиях сверхвысокого напряжения.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АОАПВ – адаптивное однофазное автоматическое повторное включение

АШФ – автоматическое шунтирование фазы

В – выключатель

ВЛ – воздушная линия

ВТД – вторичный ток дуги

ВН – восстанавливающееся напряжение

ГЭС – гидроэлектростанция

ЕЭС – единая энергетическая система

КЗ – короткое замыкание

НШР – неуправляемый шунтирующий реактор

ОАПВ – однофазное автоматическое повторное включение

ОКЗ – однофазное короткое замыкание

ОПН – ограничитель перенапряжений нелинейный

ПФ – полуфаза

СВН – сверхвысокое напряжение

УПК – установка продольной компенсации

УСВЛ – управляемые самокомпенсирующиеся воздушные линии

УШР – управляемый шунтирующий реактор

Ф – фаза

ЧТЛ – четырёхпроводная трёхфазная линия

ШБМ – шины бесконечной мощности

ШВ – шунтирующий выключатель

ШР – шунтирующий реактор

ЭДС – электродвижущая сила

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент 2765656 Российская Федерация, МПК H02J 3/26. Одноцепная линия электропередачи высокого или сверхвысокого напряжения / Г.И. Самородов, Т.Г. Красильникова; заявитель и патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет». – заявл. 27.04.2021; опубл. 01.02.2022; Бюл. № 4.
2. Александров, Г.Н. Воздушные линии электропередачи повышенной пропускной способности / Г.Н. Александров // Электричество. – 1981. – №7. – С.101–112.
3. Александров, Г.Н. Параметры воздушных линий электропередачи компактной конструкции / Г.Н. Александров, Г.А. Евдокунин, В.Г. Подпоркин // Электричество. – 1982. – №4. – С. 10-17.
4. А.с. № 974480 СССР. Воздушная линия электропередачи / Г.Н. Александров, И.М. Носов, Г.В. Подпоркин и др. заявл. 10.04.1979; опубл. 15.11.1982; Бюл. №42.
5. Patent GB 2058483 UK. Single-circuit three-phase overhead electric power transmission line of the bundled phase type. Publ. 19.10.1983.
6. Проектирование линий электропередачи сверхвысокого напряжения / Г.Н. Александров, В.В. Ершевич, С.В. Крылов и др. – Ленинград: Энергоатомиздат, – 1983. – 366 с.
7. Лысков, Ю.И. Компактные линии электропередачи 330, 500 и 750 кВ с опорами «охватывающего» типа / Ю.И. Лысков, А.И. Курносов, Н.Н. Тиходеев // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1984. – №4. – С. 3–11.
8. Александров, Г.Н. Эффективность использования ВЛ повышенной натуральной мощности / Г.Н. Александров, Г.А. Евдокунин, И.М. Носов // Электрические станции. – 1986. – № 6. – С. 55 – 59.
9. Александров, Г.Н. Оптимизация конструкции воздушных линий электропередачи повышенной пропускной способности / Г.Н. Александров //

- Электричество. – 1991. – №1. – С. 1–9.
10. Проектирование линий электропередачи сверхвысокого напряжения Г. Н. Александров, В. В. Ершевич, С. В. Крылов и др ; под ред.: Г. Н. Александрова. – Санкт–Петербург: Энергоатомиздат, – 1993. – 560 с.
 11. Самородов, Г.И. Четырехфазная линия электропередачи / Г. И. Самородов // Изв. РАН. Энергетика. – 1995. – № 6. – С. 3–11.
 12. Ворфоломеев, Г.Н. Схема Скотта: история и перспективы совершенствования (к 100-летию создания) / Г.Н. Ворфоломеев // Электричество – 1994. – № 10. – С. 74 – 77.
 13. Chen, B. Three-phase Models of Specially Connected Transformers / B. Chen, B. Guo // IEEE Transactions on Power Delivery. – Jan., 1996. – Vol. 11, iss.1. – P. 323 – 330.
 14. Нетрадиционные электропередачи переменного тока повышенной надежности для передачи электроэнергии на дальние и сверхдальние расстояния / Г.И. Самородов, Т.Г. Красильникова, СМ. Зильберман, Р.А. Яценко // Энергетическая политика. – 2003. – № 1. – С. 39–47.
 15. Белоусов, М.М. Полуволновая линия электропередачи с резервной фазой / М.М. Белоусов // Электрические станции. – 1978. – №11. – С. 59–60.
 16. Заславская, Т.Б. Алгоритмы расчета в фазных координатах сети большого объема / Т.Б. Заславская // Тр. СибНИИЭ. – 1972. – №23. – С. 66–74
 17. А.с. 610224 СССР Способ выбора резервной фазы при несимметричных коротких замыканиях на землю / Д.Т. Жанаев, Т.Б. Заславская. заявл. 01.12. 1976; опубл. 05.06. 1978; Бюл. №21.
 18. А.с. 1203623 СССР. Устройство выбора поврежденного провода на линии электропередачи с дополнительным проводом / Д.Т. Жанаев, Т.Б. Заславская. заявл. 19.08. 1983; опубл. 07.01. 1986; Бюл. №1.
 19. А.с. 1206872 СССР. Устройство для выбора поврежденного провода на линии электропередачи с дополнительным проводом / Д.Т. Жанаев, Т.Б. Заславская заявл. 05.03. 1983; опубл. 23.01. 1986; Бюл. №3.
 20. А.с. 1279006 СССР. Устройство релейной защиты и автоматики в трехфазной

- линии электропередачи с дополнительным проводом / Д.Т. Жанаев, Т.Б. Заславская. заявл. 13.12.1984; опубл. 23.12. 1986; Бюл. №47.
21. Жанаев, Д. Т. Линии электропередач с резервной фазой / Д.Т. Жанаев, Т.Б. Заславская; под ред. Ю. Н. Астахова. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, –1990. – 121 с.
 22. Левин, Д.С. Использование грозозащитного троса в качестве резервной фазы на воздушных линиях электропередачи / Д.С. Левин // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2010. – Т. 3, № 4. – С. 76–81.
 23. Левин, Д.С. Эффективность применения резервной фазы на воздушных линиях электропередачи 110-330 кВ / Д.С. Левин, Г.Г. Угаров // Вестник Самарского государственного технического университета. – 2012. – № 4. – С. 168–173.
 24. Левин, Д.С. Расчет и анализ режимов воздушных линий электропередачи с резервной фазой с учетом их пофазно различных распределенных параметров / Д.С. Левин, Д.А. Вырыханов // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2012. – Т. 2, № 2. – С. 86–92.
 25. Левин, Д.С. Режимы одноцепных воздушных линий электропередачи 110-330 кВ с использованием резервной фазы / Д.С. Левин // Вестник Донского государственного технического университета. – 2013. – № 1–2. – С. 93–96.
 26. Красильникова, Т.Г. Выбор и обоснование конструкции ВЛ СВН с резервной фазой / Т.Г. Красильникова // Материалы междунар. науч.-техн. конф. «Передача энергии переменным током на дальние и сверхдальние расстояния». Новосибирск, 2003. – С. 118–127.
 27. Зильберман, С.М. Пути обеспечения режимной надежности электропередач напряжением 500 кВ и выше / С.М. Зильберман // Электрические станции.– 2009. – № 5. – С. 42–45.
 28. Повышение эффективности эксплуатации воздушных линий электропередачи с резервной фазой / А.С. Нестеров, М.П. Лебедев, В.П. Кобылин и др. // Челябинск: Вестник ЮУрГУ серия «Энергетик» – 2016. – № 4. – С. 45–48.
 29. Stewart, J.R. High Phase Order – Ready for Application / J.R. Stewart, I.S. Grant //

- IEEE Transactions on Power Apparatus and System. – June., 1982. – Vol. PAS-101, iss. 6. – P.1757–1767.
30. Barnes, H.C. High Phase Order Power Transmission / H.C. Barnes, L.O. Barthold // CIGRE SC31, Electra. – 1973. – iss. 24. – P. 139–153.
31. High Phase Order Transmission Line Research / I.S. Grant, J.R. Stewart, D.D. Wilson, T.F. Garrity // CIGRE Symposium 22-81, Paper No. 220 – 02, Stockholm, 1981.
32. 138-kV, Six-phase Transmission System: Fault Analysis / S. S. Venkata, W. C. Guyker, W. H. Booth [et al.] // IEEE Power Engineering Review. – May., 1982. – Vol. PER-2, iss. 5. – P. 40–41.
33. Постолатий, В.М. Эффективность применения управляемых самокомпенсирующихся высоковольтных линий электропередачи и фазорегулирующих устройств трансформаторного типа / В.М. Постолатий, Е.В. Быкова // Электричество.– 2010. – № 2. – С. 7–14.
34. Процессы при однофазном автоматическом повторном включении линий высоких напряжений / Н. Н. Беляков, К. П. Кадомская, М. Л. Левинштейн и др.; под ред. М. Л. Левинштейна. – Москва: Энергоатомиздат, – 1991. – 256 с.
35. Перспективы применения ОАПВ в электропередаче 1150 кВ / Н.Н. Беляков, В.С. Рашкес, М.Л. Левинштейн, М.И. Хорошев // Электропередачи 1150 кВ. Кн.1., М.: Энергоатомиздат, 1992. – С.129–158.
36. Исследование ОАПВ в электропередачах 750 кВ с четырехлучевым реактором / Н. Н. Беляков, Л. Д. Зилес, Н. П. Камнева и др. // Электрические станции. – 1982. – № 12. – С. 43–48.
37. Goldberg, S. A Computer Model of the Secondary Arc in Single Phase Operation of Transmission Lines / S. Goldberg, W. F. Norton, D. Tziovaras // IEEE Transaction on Power Delivery. – Jan., 1989. – Vol. 4, iss. 1. – P. 586–594.
38. Электрические сети сверх- и ультравысокого напряжения ЕЭС России. Теоретические и практические основы. Том 1: Электропередачи переменного тока/ Под общей редакцией чл.-корр. РАН, д.т.н., проф. А.Ф. Дьякова – Москва: НТФ «Энергопрогресс» Корпорация «ЕЭЭК», 2012. – 696 с.

39. Майкопар, А.С. Испытания ОАПВ на электропередачах 500 кВ с шунтирующими реакторами / А.С. Майкопар, Г.З. Снитовская // Электрические станции. – 1968. – № 3. – С. 53–56.
40. Automatic reclosing of transmission lines / IEEE power system relaying committee report // IEEE Trans. on PAS. – Feb., 1984, PAS-103, iss. 2. – P. 234–245.
41. Hanbrich, H. J. Single-phase autoreclosing in EHV system / H. J. Hanbrich, G. Hosemann, R. Thomas // CIGRE. – 1974. – № 31–09.
42. Левинштейн, М.Л. Уравнения стационарных режимов линии электропередачи с однократным циклом транспозиции проводов / М.Л. Левинштейн, Ф.З. Хахимов // Изв. СО АН СССР. Сер. Техн. наук. – 1986. – № 3. – С. 122–128.
43. Terzija, V.V. On the Modeling of Long Arc in Still Air and Arc Resistance Calculation / V.V. Terzija, H. J. Koglin // IEEE Transaction on Power Delivery. – June 2004. – Vol. 19, iss. 3. – P. 88.
44. Красильникова, Т. Г. Графический метод расчета вторичных токов дуги в линиях сверхвысокого напряжения / Т. Г. Красильникова, К. А. Махмудов // Электрические станции. – 2021. – № 4 (1077). – С. 35–40.
45. Костенко, М.В. Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях высокого напряжения / М.В. Костенко, Л.С. Перельман, Ю.П. Шкарин. – М. : Энергия, 1973. – 271 с.
46. Беллман, Р. Введение в теорию матриц / Р. Беллман. – Москва: Наука, 1969. – 367 с.
47. Справочник по проектированию электроэнергетических систем / В.В. Ершевич, А.Н. Зейлигер, Г.И. Илларионов и др.; под ред. С.С. Рокотяна и И.М. Шапиро, 3-е изд. перераб. и доп. М: Энергоатомиздат, 1985. – 352 с.
48. Управляемые подмагничиванием шунтирующие реакторы / М.В. Дмитриев, А.С. Карпов, Е.Б. Шескин и др.; под ред. Г. А. Евдокунина. – СПб.: Родная Ладога, 2013. – 280 с.
49. Kimbark, W. Supression of Ground-Fault Arcs on Single-Pole Switched EHV Lines by Shunt Reactors / W. Kimbark // IEEE Transaction on Power Apparatus and

- System. – Mar.-Apr., 1964. – Vol. 83. – P. 285–290.
50. Wagner, C.F. Symmetrical component as Applied to the Analysis of Unbalanced Electrical Circuit / C.F. Wagner, R.D. Evans. – New York, 1933. – 206 p.
51. Красильникова, Т.Г. Техничко-экономические вопросы дальних электропередач переменного тока: монография / Т.Г. Красильникова, Г.И. Самородов.– Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2022. – 347 с.
52. Патент 2351050 Российская Федерация, МПК H02J 3/26. Устройство поперечной компенсации для линии электропередачи / С.М. Зильберман, Т.Г. Красильникова, Г.И. Самородов; заявитель и патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет». – заявл. 05.01.2008; опубл. 27.03.2009; Бюл. № 9.
53. Максимович, Н.Г. Линейные электрические цепи и их преобразования / Н.Г. Максимович. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 264 с.
54. Shperling, B. R. Compensation Scheme for Single-pole Switching on Untransposed Transmission Lines / B. R. Shperling, A. Fakhery, B. J. Ware // IEEE Transaction on Power Apparatus and System. – July-Aug., 1978. – Vol. PAS-97, iss. 4. – P. 1421–1429.
55. Shperling, B.R. Single-pole Switching Parameters for Untransposed EHV Transmission Lines / B.R. Shperling, A. Fakhery // IEEE Transaction on Power Apparatus and System. – Mar.-Apr. 1979. – Vol. PAS-98, iss. 2. – P. 643–654.
56. Жданов, П.С. Вопросы устойчивости электрических систем / П.С. Жданов; под ред. Л.А. Жукова. – Москва: Энергия, 1979. – 456 с.
57. Веников, В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах : учеб. для электроэнергет. спец. вузов / В.А. Веников. – 4-е изд. перераб. и доп. – Москва: Высш. шк., 1985. – 536 с.
58. Левинштейн, М.Л. Операционное исчисление в задачах электротехники / М.Л. Левинштейн. – 2-е изд. доп. – Ленинград : Энергия, 1972. – 360 с.
59. Веников, В.А. Дальние электропередачи : Спец. вопросы / В.А. Веников. – Москва; – Ленинград : Госэнергоиздат, 1960. – 312 с.

60. Красильникова, Т.Г. Физико-технические основы дальних электропередач переменного тока. / Т.Г. Красильникова, Г.И. Самородов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019. – 300 с.
61. A Novel Single-Phase Adaptive Reclosure Scheme for Transmission Lines with Shunt Reactors / J. Suonan, W. Shao, G. Song, Z. Jiao // IEEE Transaction on Power Delivery. – Apr., 2009. – Vol. 24, iss. 2. – P. 545–551.
62. Jizhong Zhu and Niancheng Zhou, «Analysis of the fault type for adaptive single-phase autoreclosure,» 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2015, pp. 1-5.
63. An alternative approach to adaptive single pole autoreclosing in high voltage transmission systems based on variable dead time control / S. Ahn, Ch. Kim, R. K. Aggarwal, A. T. Johns // IEEE Trans. Power Delivery. – Oct., 2001. – Vol. 16, iss 4. – P. 676–686.
64. Dadash Zadeh, M.R.D. Communication-aided high-speed adaptive single - phase reclosing / M.R.D. Dadash Zadeh, R. Rubeena // IEEE Trans. Power Del. – Jan., 2013. – Vol. 28, iss 1. – P. 499–506.
65. An Adaptive Reclosure Scheme for Parallel Transmission Lines with Shunt Reactors / Da. Lin, H. Wang, D. Lin, B. He // IEEE Transaction on Power Delivery. – Dec., 2015. Vol. 30, iss.6. – P. 2581–2589.
66. А.с. 1056341 СССР, МПК H02H 3/06. Устройство для контроля состояния отключенной в цикле однофазного автоматического повторного включения фазы линии электропередачи с шунтирующими реакторами / М.Л. Левинштейн, М.И. Хорошев, А.Ф. Калиниченко, Ю.И. Лысков. заявл. 22.07.1982; опубл. 23.11.1983; Бюл. № 43.

ПРИЛОЖЕНИЕ «А» ПАТЕНТЫ НА ИЗОБРЕТЕНИЯ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2727792

**Способ адаптивного однофазного автоматического
повторного включения линий электропередачи**

Патентообладатель: **ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ "НОВОСИБИРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"
(RU)**

Авторы: **Красильникова Татьяна Германовна (RU), Кошевой
Константин Эдуардович (RU), Махмудов Кароматулло
Азизович (RU)**

Заявка № 2019144393

Приоритет изобретения 24 декабря 2019 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 24 июля 2020 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 24 декабря 2039 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2761509

**Способ адаптивного однофазного автоматического
повторного включения линий электропередачи**

Патентообладатель: **ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ» (RU)**

Авторы: **Красильникова Татьяна Германовна (RU),
Махмудов Кароматулло Азизович (RU)**

Заявка № 2021111938

Приоритет изобретения **27 апреля 2021 г.**

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации **09 декабря 2021 г.**

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает **27 апреля 2041 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 0x02A5CFBC00B1ACF59A40A2F08092E9A118
Владелец **Ивлиев Григорий Петрович**
Действителен с 15.01.2021 по 15.01.2035

Г.П. Ивлиев



**ПРИЛОЖЕНИЕ «Б» АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ
ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор филиала

АО «НТЦ ФСК ЕЭС» - СибНИИЭ



Есилевич С.И.

2023 г.

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы Махмудова К.А.
«Исследование однофазного автоматического повторного включения
в четырёхпроводных трёхфазных линиях сверхвысокого напряжения»

Настоящий акт составлен в том, что разработки и рекомендации диссертационной работы Махмудова К.А., представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, касающиеся снижения вторичных токов дуги в паузу ОАПВ в четырёхпроводных трёхфазных линиях сверхвысокого напряжения, могут быть использованы при выполнении работ, связанных с созданием межсистемных связей высокой пропускной способности и надежности, а также с выдачей мощности вновь создаваемых электростанций по четырёхпроводным трёхфазным линиям вместо традиционных двухцепных линий.

Предметом рассмотрения для внедрения также может быть предложенный в работе способ усовершенствования адаптивного ОАПВ, который позволяет надёжно идентифицировать однофазное короткое или дуговое замыкание в линиях сверхвысокого напряжения.

Начальник департамента
инновационной деятельности

Савотин О.А.

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по учебной работе

К.Э.Н., доцент

С.С. Чернов



05 2023 г.

АКТ

о внедрении в учебный процесс Новосибирского государственного
технического университета результатов диссертационной работы
К.А. Махмудова

Настоящим актом подтверждается внедрение результатов диссертационной работы К.А. Махмудова на тему «Исследование однофазного автоматического повторного включения в четырёхпроводных трёхфазных линиях сверхвысокого напряжения» в учебный процесс кафедры «Автоматизированные электроэнергетические системы» Новосибирского государственного технического университета.

В диссертации предложена математическая модель четырёхпроводной трёхфазной линии, разработаны графический метод расчета вторичных токов дуги в линиях СВН в режиме бестоковой паузы ОАПВ и методика совместного анализа динамической устойчивости энергообъединения и режима на линии в паузу ОАПВ. Результаты диссертации включены в практические занятия по дисциплине «Передающие электрические сети». Материалы диссертационной работы могут быть использованы при написании выпускных квалификационных работ бакалавров и магистерских диссертаций с соответствующей тематикой, а также в дальнейших исследованиях аспирантов.

Заведующий кафедрой АЭЭС
д.т.н., доцент

Левин В.М.



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН

ТАДЖИКСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

имени академика М.С. Осими

734042, Душанбе, просп. акад. Раджабовых, 10. Тел.: (+992 37) 221-35-11, Факс: (+992 37) 221-71-35,

E-mail: ttu@ttu.ru, Web: www.ttu.tj

«УТВЕРЖДАЮ»

Ректор ТТУ им. акад. М.С. Осими
д.э.н., профессор Давлатзода К.К.

«15» _____ 2023 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Махмудова К.А. в учебный процесс Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими

Комиссия в составе: проректора по учебной работе, первого проректора д.т.н., профессора Махмадизода М.М. – председателя комиссии, начальника управления науки и инновации к.т.н. Бозорова Ш.А. и заведующего кафедрой электрические станции к.т.н., доцента Султонзода Ш.М. – членов комиссии, настоящим подтверждаем, что результаты научного исследования Махмудова К.А. на тему «Исследование однофазного автоматического повторного включения в четырёхпроводных трёхфазных линиях сверхвысокого напряжения» используются в учебном процессе Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими.


Основные положения и результаты диссертации могут быть использованы для подготовки специалистов и магистров по специальности «Электрические станции» в курсах «Оптимизация электроэнергетических систем» и «Режимы работы энергетических систем» Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими.


Изучение указанных результатов позволяет повысить качество изучения вышеуказанных дисциплин с учетом современных научных и практических требований.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ КОМИССИИ:

Проректор по учебной работе, первый проректор  Махмадизода М.М.

ЧЛЕНЫ КОМИССИИ:

Начальник управления науки и инновации  Бозоров Ш.А.

Заведующий кафедрой электрические станции  Султонзода Ш.М.