

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования
«Санкт-Петербургский горный университет»

На правах рукописи

Соловьев Сергей Викторович

**Повышение передаваемой активной мощности в распределительной
сети среднего напряжения электротехнического комплекса
промышленного предприятия**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ –
доктор технических наук,
доцент Я.Э. Шклярский

Санкт-Петербург– 2017

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ УВЕЛИЧЕНИЯ ПЕРЕДАВАЕМОЙ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ СЕТЕЙ СРЕДНЕГО УРОВНЯ НАПРЯЖЕНИЯ	13
1.1 Системы электроснабжения промышленных предприятий	14
1.1.1 Системы электроснабжения горных предприятий.....	14
1.1.2 Электроснабжение предприятий нефтегазовой промышленности	17
1.2 Передаваемая активная мощность в электротехническом комплексе предприятия ..	21
1.3 Меры по увеличению передаваемой активной мощности в распределительных сетях электротехнического комплекса предприятия	22
1.4 Увеличение передаваемой активной мощности без замены проводников	25
1.4.1 СТАТКОМ.....	27
1.4.2 Вольтодобавочные трансформаторы.....	28
1.4.3 Продольная емкостная компенсация	31
1.4.4 Поперечно-емкостная компенсация	33
1.5 Изменение рода тока.....	35
ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 1	41
ГЛАВА 2 СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ПЕРЕДАВАЕМОЙ В НАГРУЗКУ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ	45
2.1 Передаваемая в нагрузку активная мощность	45
2.2 Компьютерная модель линии электропередач распределительной сети промышленного предприятия и нагрузки.....	50
2.3 Адаптация модели к статическим характеристикам нагрузки	55
2.3.1 Учёт статических характеристик нагрузки	55
2.3.2 Итерационный расчёт параметров сети с одновременным учётом статических характеристик нагрузки и внутреннего импеданса сети	58
2.3.3 Оценка ошибки определения передаваемой мощности без учёта статических характеристик.....	61

2.4 Увеличение передаваемой активной мощности распределительной сети посредством применения компенсирующих устройств.....	64
2.4.1 Ограничение по допустимому току	66
ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 2	69
ГЛАВА 3 ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СПОСОБОВ ПЕРЕВОДА РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ НА ПОСТОЯННЫЙ ТОК.....	71
3.1 Учет снижения полного сопротивления линии при переводе на постоянный ток.....	72
3.2 Анализ потока мощности.....	75
3.3 Выбор напряжения распределительной сети постоянного тока	77
3.4 Реконструкция трехпроводной линии переменного тока в двухпроводную линию постоянного тока.....	80
3.5 Реконструкция трехпроводной линии переменного тока в трехпроводную линию постоянного тока в распределительных сетях промышленного предприятия	86
3.6 Способы передачи электроэнергии по трем проводам с повторно-кратковременной перегрузкой проводов по току.....	88
3.7 Способ передачи электроэнергии постоянным током с возвратом по земле	93
3.7.1 Повышение напряжения распределительной сети.....	97
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3	99
ГЛАВА 4 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ В РЕЖИМЕ ПОВТОРНО-КРАТКОВРЕМЕННОЙ ПЕРЕГРУЗКИ	101
4.1 Схема замещения на основе электротепловой аналогии	103
4.2 Структура модели передачи электроэнергии нагрузке по трехпроводной линии постоянным током	106
4.3 Моделирование процессов передачи электроэнергии постоянным током	112
4.3.1 Передача электроэнергии постоянным током по схеме «один прямой два обратных» при условии бесконечно большого коэффициента запаса линии по току.....	113
4.3.2 Передача электроэнергии постоянным током в режиме повторно-кратковременной перегрузки проводов при условии бесконечно большого коэффициента запаса линии по току	114

4.3.3 Передача электроэнергии постоянным током в режиме повторно-кратковременной перегрузки проводов при условии, что коэффициент запаса линии по току до перевода был равен единице	118
4.3.4 Передача электроэнергии постоянным током в режиме повторно-кратковременной перегрузки проводов с оптимальным периодом их переключения	120
4.4 Применение методики повышения передаваемой активной мощности электротехнического комплекса к промышленному объекту.....	122
ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 4	125
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	127
Список литературы	130
Приложение А.....	142

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

В связи с ежегодным увеличением темпов роста нагрузки промышленных предприятий, а в частности добывающего и обрабатывающего сегмента топливно-энергетического комплекса, требуется увеличение передаваемой активной мощности. Распределительные сети, питающие предприятия, в основном работают на среднем уровне напряжения, что обуславливается мощностью потребителей на подобных объектах.

С увеличением мощности потребителя, требуется увеличение передаваемой активной мощности распределительных сетей предприятий. Существует больше количество методов, позволяющих обеспечить увеличение передаваемой активной мощности. Однако при условии, что провода линии еще не выработали срок службы, их замена не требуется. Кроме того, замена проводников связана со значительным вложением денежных средств, при большом удалении конечного потребителя от распределительной подстанции предприятия, сложностью замены на многих добывающих комплексах, а также простоем предприятия, что влечет за собой значительные убытки. В этом случае, следует обеспечить увеличение передаваемой активной мощности без замены проводов.

Проблемы повышения передаваемой активной мощности актуальны и рассматриваются в сетях высокого уровня напряжения, с присущими только этому уровню напряжения особенностями. Однако, в этом случае слабо обозначается связь между линией передачи и конкретным предприятием.

Проработанность темы

Известны способы увеличения передаваемой активной мощности в электротехнических комплексах предприятий, к которым относятся устройства продольной и поперечной компенсации реактивной мощности и использование вольто-добавочных трансформаторов в разных видах. Решением этой проблемы, занимались такие ученые как: J. Arrilaga, Ю.Б. Прибытков, А. А. Глазунов, С.В. Смолвик, E.W. Kimbark и другие. Однако указанными авторами не даны сравнительные характеристики различных способов, позволяющие выбрать из них наиболее эффективный. До сих пор в распределительной сети предприятия на среднем уровне напряжения не рассматривалась возможность перевода питания нагрузки с переменного на постоянный ток и не определена эффективность такого перевода.

Увеличение передаваемой активной мощности путем перевода трехпроводной линии электропередач рассматривалось лишь для сетей высокого и сверхвысокого напряжений. Идея перевода линий электропередач среднего уровня напряжения на постоянный ток была рассмотрена только в одной работе (G.Bathurst), при этом данная концепция не рассматривается для распределительных сетей промышленных предприятий.

С учетом вышесказанного, выявление и отчасти разработка наиболее эффективного способа по увеличению передаваемой активной мощности распределительных сетей среднего напряжения электротехнического комплекса предприятия представляется актуальными и имеет практическое значение.

Диссертация соответствует паспорту специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы (технические науки): 1. Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов

и систем; п.2 «Обоснование совокупности технических, технологических, экономических, экологических и социальных критериев оценки принимаемых решений в области проектирования, создания и эксплуатации электротехнических комплексов и систем»; п.3 «Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления».

Цель работы

Повышение передаваемой активной мощности в распределительной сети переменного тока среднего уровня напряжения электротехнического комплекса предприятий путем обоснованного выбора наиболее эффективного технического решения.

Основные задачи исследования

1. Анализ существующих способов повышения передаваемой активной мощности распределительных сетей переменного тока.
2. Определение зависимостей передаваемой переменным и постоянным током активной мощности от параметров распределительной сети предприятия и его нагрузки.
3. Разработка критериев, обеспечивающих обоснованный выбор способа повышения передаваемой активной мощности в распределительной сети.
4. Выявление наиболее эффективных по разработанному критерию способов перевода линии электропередачи на постоянный ток.
5. Оценка эффективности применения предлагаемых способов повышения передаваемой активной мощности в эксплуатируемых распределительных сетях промышленных предприятий.

Идея работы

Повышение передаваемой активной мощности в распределительных сетях среднего напряжения промышленного предприятия должно осуществляться с использованием компенсирующих устройств или перевода линии переменного на постоянный ток с учетом разработанного критерия запаса по активной мощности.

Научная новизна

1. Разработан алгоритм выбора способа повышения передаваемой активной мощности распределительных сетей среднего уровня напряжения на основе аналитических выражений, учитывающих ограничения по допустимому напряжению и току с учетом статических характеристик нагрузки.

2. Разработан критерий выбора способа увеличения передаваемой активной мощности распределительных сетей в виде коэффициента запаса по мощности, позволяющий выбрать наиболее эффективный способ увеличения передаваемой мощности в электротехнических комплексах предприятий.

3. Получены зависимости передаваемой активной мощности трехпроводной линии от ее параметров при использовании компенсирующих устройств либо изменении рода тока.

4. Обоснован способ передачи электроэнергии при переходе на постоянный ток с последующим циклическим переключением проводов, позволяющий увеличить действующее значение тока в распределительных сетях.

Достоверность выводов и рекомендаций, изложенных в диссертации, подтверждается применением апробированных методов математического и имитационного моделирования и достаточной сходимостью результатов математического и имитационного моделирования схем электроснабжения среднего уровня напряжения.

Практическая значимость работы

Заключается в том, что зависимости и разработанный критерий максимума передаваемой активной мощности, полученный в ходе исследования, позволяют осуществлять выбор способа увеличения передаваемой активной мощности. Разработанный метод передачи электроэнергии путем переключения проводов трехпроводной линии в распределительных сетях постоянного тока позволяет существенно увеличить передаваемую активную мощность за счет возможности увеличения протекающего тока и напряжения.

Разработана имитационная модель, позволяющая оценить передаваемую в нагрузку активную мощность линии в радиальной распределительной сети, с учетом статических характеристик нагрузки сетей. Разработана имитационная модель, позволяющая оценить активную мощность, передаваемую в линии постоянного тока с переключением проводов по принципу «один прямой, два обратных».

Методы исследования

Для решения поставленных задач использовались методы теории электрических цепей и электроснабжения, математического моделирования электрических цепей с использованием пакета *MATLAB*, интерполяции и аппроксимации данных.

Реализация выводов и рекомендаций работы

Применение критерия при выборе способа повышения передаваемой активной мощности распределительных сетей среднего уровня напряжения без замены проводов, а также разработанного способа передачи электроэнергии путем переключения проводов в трехпроводной линии постоянного тока рекомендуется к внедрению ОАО «Северсталь».

Личный вклад автора

1. Разработана математическая и имитационная модель распределительной сети, позволяющая оценить изменение передаваемой активной мощности распределительной сети при изменении ее параметров.

2. Проведены аналитические исследования, на основе которых были разработаны критерий и метод выбора параметров технических устройств, требуемых для увеличения передаваемой активной мощности распределительной сети.

3. Проведены аналитические исследования, в ходе которых определены наиболее эффективные по критерию повышения передаваемой активной мощности способы перевода трехпроводной линии распределительной сети переменного тока на постоянный ток.

4. Разработана математическая и имитационная модели, оценивающие увеличение передаваемой активной мощности распределительной сети при изменении рода тока.

5. Разработан метод выбора емкости сглаживающего конденсатора в трехпроводной системе электропередачи постоянного тока.

6. Установлен оптимальный период переключения проводов, при передаче электроэнергии постоянным по трем проводам способом «один прямой, два обратных» в режиме повторно-кратковременной перегрузки проводов по току.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Выбор способа повышения пропускной способности и передаваемой активной мощности распределительной сети среднего уровня напряжения электротехнического комплекса предприятия в случае применения компенсаторов потерь напряжения следует осуществлять исходя из разработанного алгоритма, в основу которого положены аналитические выражения, учитывающие ограничения по допустимому напряжению и току с учетом статической характеристики нагрузки, что позволит наиболее эффективно использовать существующую систему передачи электроэнергии без увеличения сечения проводов.

2. При переводе трехпроводной линии электропередач среднего уровня напряжения электротехнического комплекса предприятия с переменного на постоянный ток следует выбирать способ передачи электроэнергии использующий землю в качестве проводника, при невозможности использования земли в электропередаче следует выбирать способ с попеременным переключением проводов, период переключения которых зависит от допустимого тока проводов и индуктивности линии электропередачи, что позволяет увеличить пропускную способность линии электропередачи не менее, чем на 11%.

Апробация

Основные положения и результаты работы докладывались и получили положительную оценку на: II-ой международный научно-технический семинар «Современные разработки в области электроснабжения и электропривода», г. Санкт-Петербург, 26 апреля 2016 г., Международная научно-техническая конференция «Современные проблемы машиностроения», г. Томск, 27-29 октября 2016 г., Международная научно-техническая конференция «Инновации и перспективы развития горного

машиностроения и электромеханики: IPDME-2017», г. Санкт-Петербург, 23-24 марта 2017.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 5 печатных работ, в том числе 3 в научных изданиях, рекомендованных ВАК Российской Федерации, и получено свидетельство на программный продукт.

Структура и объем диссертации

Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 99 наименований, изложена на 144 страницах машинописного текста и содержит 54 рисунка, 2 таблицы, 1 приложение.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ УВЕЛИЧЕНИЯ ПЕРЕДАВАЕМОЙ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ СЕТЕЙ СРЕДНЕГО УРОВНЯ НАПРЯЖЕНИЯ

На сегодняшний день наблюдается значительное увеличение нагрузки на распределительные сети предприятий. Этот процесс является естественным и продиктован развитием промышленности. В России к 2020 году прогнозируется рост спроса на топливно-энергетические ресурсы порядка 27-40% при росте ВВП в 2,3-3,3 раза [1]. Следовательно, системы электроснабжения (СЭС) предприятий должны модернизироваться согласно росту передаваемой мощности. Прежде всего, это касается части электротехнического комплекса предприятия, а именно распределительных сетей, которые содержат сети среднего (6-35 кВ) и низкого (до 1 кВ) уровня напряжения. Как следует из анализа СЭС предприятий, распределительные сети среднего напряжения обладают значительно большей суммарной протяженностью по отношению к сетям низкого напряжения. При этом, некоторые линии электропередач среднего напряжения имеют большую протяженность, что налагает ограничение на передаваемую по ним активную мощность [2,3]. Средний срок службы распределительной линии должен быть не меньше 40 лет для напряжения ниже 35 кВ и не менее 50 лет для линий напряжением выше 35 кВ согласно нормативным документам [4]. При таком ежегодном приросте мощности потребителей, уже к середине срока эксплуатации, передаваемая активная мощность предприятий должна быть увеличена в 1,5-2 раза.

Правительство РФ планирует выделить 120-170 млрд. долл. на развитие электроэнергетики, из них на электроснабжение 50-70 млрд. долл., в которые входит, в том числе, модернизация старых сетей и строительство новых [5]. Особый приоритет имеют регионы с развитой горно- и нефтегазодобывающей промышленностью.

Как в иностранной литературе, так и отечественной описано большое количество технических решений по увеличению эффективности передачи электроэнергии для существующих (без изменения) распределительных сетей [6–11]. Эффективность передачи характеризуется потерями электроэнергии и передаваемой активной мощностью линии электропередач [12,13]. Рассмотрим различные способы повышения активной мощности, передаваемой по линиям электропередач распределительных сетей промышленных предприятий.

1.1 Системы электроснабжения промышленных предприятий

Распределительные сети среднего уровня напряжения входят в состав большого количества СЭС производственных комплексов. Диапазон мощности таких предприятий варьируется от нескольких до сотен мегаватт, при этом назначение предприятий может быть самым разным. Выделяются три категории по мощности предприятия: крупные (более 75 МВт), средние (от 5 до 75 МВт) и малые (до 5 МВт). При наличии распределительных сетей 6-10 кВ по нормативным требованиям предприятие относится к средним или крупным. Подводимый ток в таких сетях может достигать 1-1,5 кА, что выставляется жесткие требования к питающим распределительным сетям, расположенным после распределительной подстанции. Рассмотрим некоторые примеры применения распределительных сетей 6, 10 и 35 кВ в электротехнических комплексах предприятий.

1.1.1 Системы электроснабжения горных предприятий

Для любого предприятия основными потребителями мощности являются электрические машины. Особенно это касается горнодобывающей промышленности, где используются мощные конвейеры, очистные комбайны, насосы и т.д. Способы питания подземных потребителей зависят от множества факторов: глубины залегания пласта, мощности, характера нагрузки и так далее. Однако, большая часть из них питается сетями

напряжением 6-10 кВ [14]. Если требуется меньшее напряжение, обычно рядом с потребителем устанавливается понижающий трансформатор. Таким образом, сети среднего уровня напряжения являются на производстве наиболее протяженными.

На рисунке 1.1.1 представлена схема электроснабжения шахты глубокого залегания. В таком случае электроснабжение осуществляется по радиальной схеме через ствол шахты.

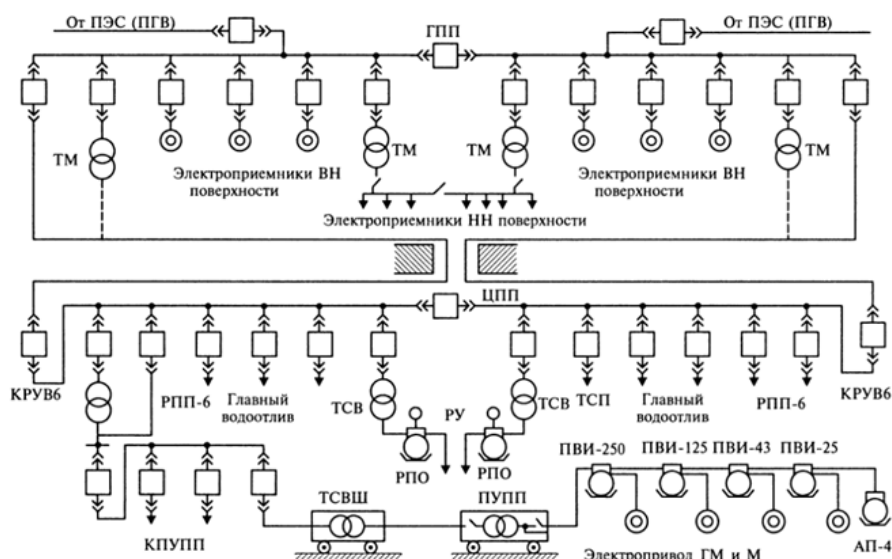


Рисунок 1.1.1 – Однолинейная схема электроснабжения подземных горных работ через ствол шахты

Подробно рассмотрим угольную шахту «Воргашорская». Начиная с 1975 года, добыча угля выросла до 12-13 млн. тонн. Планируемая добыча за счет ввода новых лав в эксплуатацию, по планам ОАО «Северсталь-ресурс», которой принадлежит шахта, должна увеличиться до 27-28 млн. тонн.

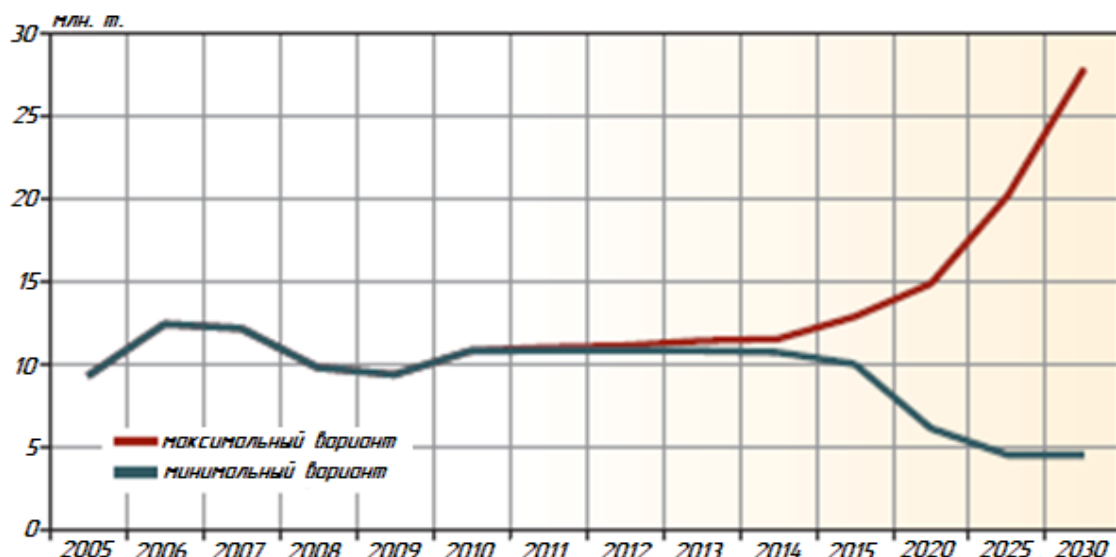


Рисунок 1.1.2 – Возможности увеличения добычи угля в ОАО «Северсталь-ресурс» до 2030 года

Таким образом, ежегодно, с увеличением нагрузки, растет потребляемая активная мощность. Ближайшая вводимая в эксплуатацию лава на «Воргашорской» угольной шахте - 233с. Длина очистного забоя 285 м, а длина выемочного столба чуть более 3 км. Мощность угольного пласта – от 2,8 до 2,9 м. Проектная нагрузка лавы составляет 9,7 тыс. тонн в сутки, что позволит добывать до 280 тыс. тонн угля ежемесячно. Суммарная потребляемая мощность составляет порядка 3,5 МВт в начале проходки и будет увеличиваться при углублении лавы. Увеличение потребляемой мощности при вводе лавы в эксплуатацию составит порядка 5,5-6% от общего энергопотребления, и впоследствии будет увеличиваться пропорционально проходу очистного комбайна вглубь разреза.

Другим примером СЭС является схема электроснабжения в внутри производственных комплексов, типичными представителями которых являются обогатительные фабрики. Распределительные сети внутри таких предприятий также содержат, прежде всего, радиальные распределительные сети (Рисунок 1.1.3)

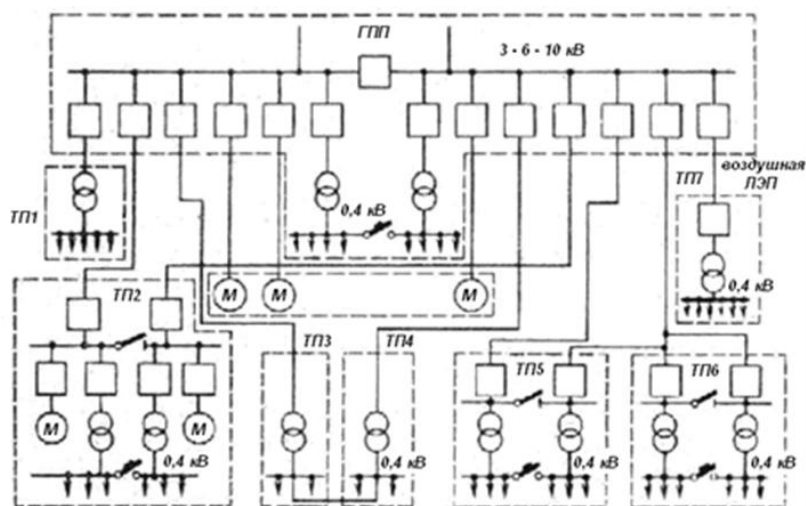


Рисунок 1.1.3 – Принципиальная схема внутреннего электроснабжения обогатительной фабрики

Как видно из схемы, основная шина распределительной сети питается напряжением 6-10 кВ. Так как обычно на таких предприятиях увеличение потребляемой мощности сопряжено с запуском нового цеха или расширением производства, скачек потребляемой мощности будет значительный. Например, мощность установок первичного дробления варьируется от сотен киловатт до нескольких мегаватт. Зачастую используются мощные синхронные машины, мощностью от 1 МВт и выше. При этом подавляющее большинство электродвигателей в составе установок работает в длительно-непрерывном режиме, что накладывает определенные требования по ГОСТу к электроснабжению и допустимому напряжению в распределительных сетях.

1.1.2 Электроснабжение предприятий нефтегазовой промышленности

Рассмотрим комплекс технологического оборудования по добыче нефти. При использовании кустового способа добычи нефти распределение электроэнергии сопряжено со значительными расстояниями как между кустами скважин, так и до вспомогательных установок, таких как компрессорные станции. В отличие от электроснабжения шахт, обычно

используются воздушные, а не кабельные линии. На рисунке 1.2.4 представлена поопорная схема Верхнетарского нефтяного месторождения.

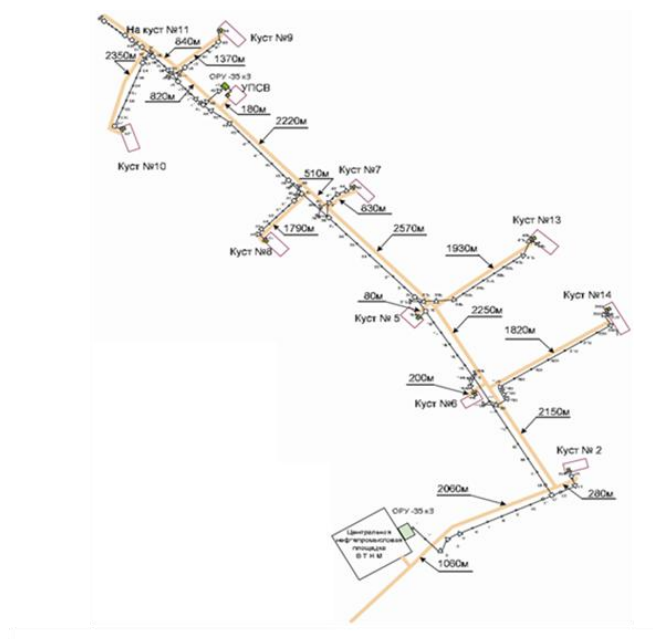


Рисунок 1.1.4 – Поопорная схема Верхнетарского нефтяного месторождения

Питание погружных насосов осуществляется напряжением 6 кВ, идущего от центральной распределительной станции. Как видно из рисунка расстояние от распределительной станции до потребителя может достигать до 11 км, ответвления от основной магистральной части магистральной линии может достигать до 5 км.

При напряжении 6 кВ энергия подается к буровым установкам, компрессорным станциям, насосам перекачки нефти, водяным насосам системы поддержания пластового давления, трансформаторным подстанциям 6/0,4 кВ, питающим электрооборудование скважин насосной эксплуатации. Ввод следующего куста скважины увеличивает общую нагрузку на 500-600 кВт при бурении и дополнительно 400-600 кВт для насосов буровых установок. Таким образом, ввод следующего куста скважины увеличит потребляемую мощность на 10-15%. При увеличении нагрузки, растут токи нагрузки, с учетом большой протяженности магистральной линии это

повлечет за собой увеличение падения напряжения. Уровень напряжения в свою очередь влечет за собой уменьшение пропускной способности распределительной сети. Ввод устройств компенсации падения напряжения позволит увеличить уровень напряжения, что положительно скажется на пропускной способности [15].

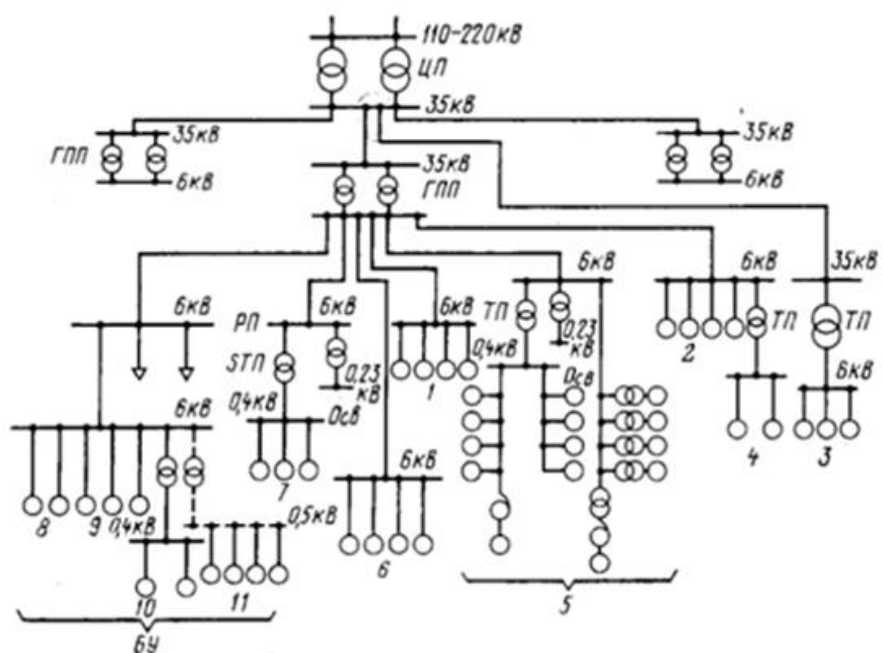


Рисунок 1.1.5 – Вариант схемы электроснабжения объектов нефтяных промыслов.

На приведенном рисунке ЦП - центр питания; ГПП - главная понижающая подстанция; РП - распределительный пункт; ТП - трансформаторная подстанция; БУ - буровая установка

Электроснабжение заводов по переработке нефти также осуществляется на напряжении 6-35 кВ. Также используется радиальная схема электроснабжения (рисунок 1.1.6)

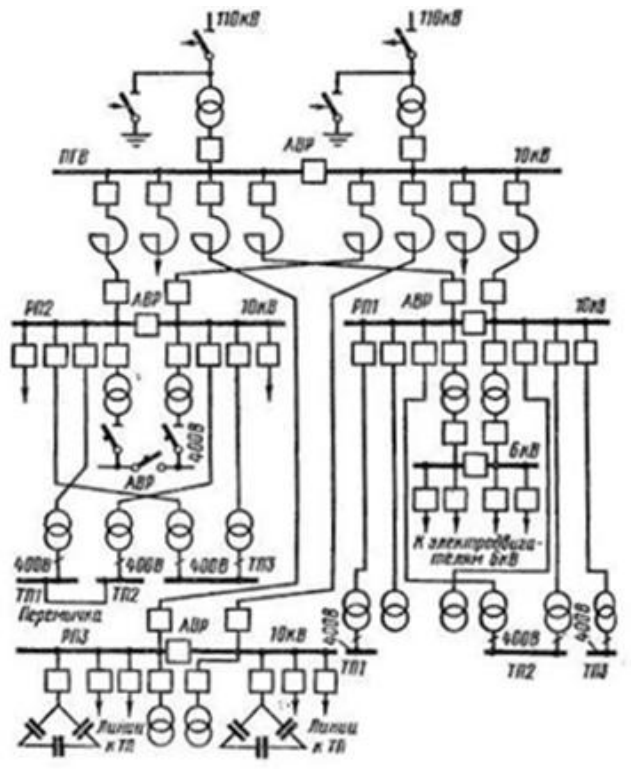


Рисунок 1.1.6 – Схема электроснабжения нефтеперерабатывающего предприятия

Большинство современных нефтеперерабатывающих заводов являются крупными потребителями электроэнергии. Так же как и в приведенных выше примерах, электроснабжение на подобных объектах сопряжено со значительными расстояниями и большими мощностями. Добыча нефти растет с каждым годом, что обуславливает рост мощности потребителя.

Подводя итог, следует отметить, что эксплуатация предприятий горнодобывающей промышленности, а также нефтедобывающих и перерабатывающих комплексов, сопряжена с развитием производства или добычи. При этом увеличивается нагрузка на распределительные сети, что приводит к необходимости увеличения пропускной способности питающих сетей. Все приведенные примеры характеризуются тем, что используются радиальные или магистральные распределительные сети среднего уровня напряжения. В большинстве случаев протяженность линий от главной

подстанции, питающей предприятие, значительна и составляет несколько километров.

1.2 Передаваемая активная мощность в электротехническом комплексе предприятия

Распределительная сеть характеризуется передаваемой активной мощностью, которая зависит от ряда факторов. Наибольшую активную мощность, которую можно передать по линии электропередачи нагрузке с учетом всех ограничивающих условий будем называть пропускной способностью линии. Пропускная способность линии определяется по условиям [16–19]:

- падения напряжения;
- теплового предела;
- устойчивости системы.

Так как для средних уровней напряжения активная проводимость, которая выражает коронарные потери и токи утечки через изоляторы, мала, то ею в расчетах пренебрегают. Учет коронарного излучения становится целесообразным на высоких уровнях напряжения (с 110 кВ и при сечении проводника в 70 мм²) и характеризуется допустимой напряжённостью поля у проводника, которая не должна превышать 21,2 кВ/см [20]. На средних уровнях напряжения такая напряженность поля достигается крайне редко, в случае высокой влажности окружающей среды и при определенном сечении кабеля. Для кабельных линий диэлектрические потери указываются заводом–изготовителем.

Устойчивость системы напрямую влияет на пропускную способность линии, так как при высокой загрузке сети устойчивость падает. Сопротивление линии уменьшает синхронизирующую мощность генераторов в ней и затрудняет их параллельную работу. Основным

способом повышения устойчивости является увеличения передаваемой активной мощности, но также возможно использование компенсирующих устройств и других способов.

Основными двумя факторами, которые ограничивают пропускную способность линии в распределительной сети предприятия, являются пределы падения напряжения на линии электропередач и тепловой предел [21]. Падение напряжения регламентируется ГОСТ 29322-2014 «Напряжения стандартные», в котором сказано, что отклонение напряжения не должно быть более $\pm 10\%$ от номинального при диапазоне от 1 кВ до 35 кВ [22]. Падение напряжения зависит от тока, протекающего в проводнике и полного сопротивления проводов линии электропередач. Если падение напряжения в линии превышает регламентированное пороговое значение, требуются специальные меры по его минимизации [15]. В таком случае требуется уменьшить ток, либо сопротивление. Если уменьшить ток можно путем увеличения напряжения, то изменение сопротивления не всегда возможно, так как требуется замена проводников. Подробнее об этом будет рассказано далее.

Ограничение передаваемой активной мощности по тепловому пределу, согласно закону Джоуля – Ленца, зависит от тока и активного сопротивления. Проводник при преобразовании электрической энергии в тепловую нагревается, что создает дополнительные потери в линии [23].

1.3 Меры по увеличению передаваемой активной мощности в распределительных сетях электротехнического комплекса предприятия

Существует большое количество различных способов увеличения передаваемой активной мощности. Принципиально можно выделить два способа – с заменой проводников, и без замены проводников. Это обусловлено тем, что линии электропередач среднего напряжения имеют зачастую большую протяженность. Замена проводников воздушных линий в

таком случае может занять продолжительное время и потребует больших капиталовложений. Более того, опорные конструкции имеют предел по весу проводов, которые на них можно закрепить, и при изменении сечения проводника, может потребоваться замена или модернизация опор [24].

Самым очевидным способом увеличения передаваемой активной мощности является строительство дополнительной линии электропередач в составе СЭС. Она может быть проложена как параллельно уже существующей, так и иметь другой маршрут, благодаря особенностям местности (например, жилые районы, где всегда испытывается недостаток в площади, пригодной для строительства). Такой способ позволяет увеличивать пропускную способность линии во сколько угодно раз, однако при этом значительно вырастают капиталовложения. Следует отметить, что на сегодняшний день это наиболее распространенный способ, так как не требуется перепланирование уже существующей распределительной сети [25].

Если основные ограничения вызывает тепловой предел в проводнике, то на сегодняшний день существует решение в виде замены проводников на более современные, а именно термостойкие материалы или с использованием специальных устройств для охлаждения существующих проводников [26]. Такие провода более износостойкие, а имеют меньшее сопротивление за счет компоновки жил. По разным данным тепловые потери можно сократить на несколько процентов, что пропорционально увеличит пропускную способность и максимальную возможную длину в данной конфигурации линии.

Эффект от такой замены очевиден, так как активное сопротивление проводника обратно пропорционально его сечению (1.3.1)

$$R_{20} = \frac{\rho l}{S_{\text{пр}}}, \quad (1.3.1)$$

где ρ – удельное сопротивление материала, Ом·м, l – длина проводника, м (при погонном сопротивлении, $l = 1$), S_{np} – площадь сечения проводника, м². При увеличении сечения проводника упадет и падение напряжения и потери активной мощности, которые переходят в тепло, будут меньше.

В дополнение, за счет увеличения сечения проводников, можно перевести напряжение на более высокий уровень. За счет этого понижается ток, и уменьшается падение напряжения и активная мощность проводника. Зачастую такое повышение уровня напряжения ведет за собой замену трансформаторов, так как они рассчитаны только на один коэффициент трансформации и соответственно переводят напряжение только на определенную ступень напряжения. Это влечет за собой дополнительные капиталовложения [27].

Все перечисленные методы требуют проведения длительных и дорогостоящих монтажных работ, что ставит под вопрос их целесообразность для использования в линии достаточной протяженности. Для локальных линий электропередач, чья длина не превышает нескольких километров, общие затраты на замену проводников будут незначительны. Замена проводников в длинной линии электропередач влечет за собой остановку электроснабжения предприятия. В случае с добывающими или обрабатывающими предприятиями это приводит к значительным убыткам, особенно в условиях безостановочного производства. Электроснабжение жилых районов, особенно в северной части России, должно быть постоянным. Требуется вводить резервные источники питания, которыми обычно выступают дизельгенераторные устройства. Затрата на их аренду/покупку, а также затраты на топливо, делает процедуру резервирования также капиталоемкой. Что ставит вопрос о необходимости использования подхода по увеличению передаваемой активной мощности линии.

Замена кабельных линий электропередач также сложна. Значительным преимуществом перед воздушными линиями является то, что конструктивно они не содержат опоры, которые составляют от 60 до 80% от общей стоимости СЭС. Обычно кабельные линии прокладываются в траншеях, поэтому, как правило, в этом случае требуется извлечение старого кабеля и прокладка нового с большим сечением проводов. В городских условиях эта задача может оказаться более комплексной в виду наличия асфальта или брусчатки. Небольшая протяженность кабельных линий (до 50 км позволяет выполнить модернизацию линии электропередач относительно быстро [28,29].

Увеличение передаваемой активной мощности за счет замены токопроводящих элементов требует двух наиболее ценных ресурсов – времени и капиталовложения. Данная операция не всегда возможна, если от модернизируемой линии питается потребитель первой или специальной категории. В таком случае требуются применение других способов увеличения передаваемой активной мощности.

1.4 Увеличение передаваемой активной мощности без замены проводников

Рассматривая потребители, приведенные в разделе 1.1, а именно горнодобывающие и нефтегазовые комплексы, отмечается, что производственный процесс на таких предприятиях зачастую непрерывен. В таком режиме, замена токоведущих частей СЭС является затратной по времени. В основном это связано с большими расстояниями до потребителей и сложностью прокладки новых линий электропередач в составе СЭС.

Существует несколько способов увеличения пропускной способности распределительной сети без замены проводов. Пропускная способность сети – это максимальная возможная передаваемая активная мощность по ее проводникам. Если коэффициент мощности нагрузки ($\cos\varphi$) не равен

единице, то не вся передаваемая по линии мощность будет активной. При непосредственном подключении потребителя к питающей сети, коэффициент мощности будет меньше единицы. В этом случае, целесообразно использовать устройства, компенсирующие реактивную мощность [30]. Так как основными потребителями на промышленных комплексах являются электроприводы и трансформаторы, из сети потребляется значительная реактивная мощность. Например, коэффициент мощности погружных электродвигателей насосов на нефтяных скважинах составляет в среднем 0,74-0,78. Коэффициент мощности синхронного двигателя в дробилке колеблется в районе 0,9. Скомпенсировав реактивную мощность потребителя, можно увеличить передаваемую мощность.

Традиционно, до формирования доступного рынка полупроводниковых силовых приборов, показатели качества электроэнергии достигались с помощью комбинаций пассивных элементов – катушек индуктивности, конденсаторов и резисторов. Для компенсации реактивной мощности в таком случае устанавливают параллельно подключенные конденсаторы, которые генерируют необходимое количество реактивной мощности, исключая её передачу через распределительные сети. Кроме того, для компенсации высших гармонических составляющих применялись RLC–контур, также подключаемые параллельно нагрузке, либо участку сети, в которой находится источник нелинейных искажений. В настоящее время такие устройства, уступают место активным устройствам, построенным на силовых полупроводниковых ключах. По сравнению с активными, у пассивных компенсаторов можно выделить следующие недостатки:

- на высоких мощностях их стоимость сопоставима со стоимостью активных устройств;
- добротность пассивных фильтров не бесконечна;

- устройства, построенные на пассивных компонентах, должны быть спроектированы под конкретную сеть (например, расчёт параметров RLC–контура), таким образом при изменении структуры сети уже установленные устройства вероятно необходимо будет заменить;

- на высоких мощностях масса и габариты пассивных фильтров и компенсаторов значительно увеличиваются.

Повышение эффективности передачи электроэнергии линиями переменного тока в распределительной сети предприятия также достигается совместным применением высоковольтных управляемых шунтирующих реакторов, статических компенсаторов реактивной мощности как тиристорных, так и на базе полностью управляемых полупроводниковых приборов (типа СТАТКОМ), фазоповоротных устройств и управляемых устройств последовательной компенсации [31]. В России ФСК ЕЭС занимается внедрением этой технологии для повышения эффективности работы энергосистемы страны [32].

Ниже приведены краткие характеристики указанных компенсирующих устройств.

1.4.1 СТАТКОМ

Статический синхронный компенсатор (static synchronous compensator – СТАТКОМ). Представляет собой накопитель энергии в звене постоянного тока (ЗПТ) подключенный к сети через статический силовой преобразователь, обычно выполнены либо на IGBT либо IGCT ключах. Существуют две разновидности STATCOM – выполненные на основе источника напряжения, тогда в качестве накопителя энергии используется конденсатор; либо выполненные на основе источника тока, тогда в качестве накопителя энергии используется индуктивность. В настоящее время STATCOM реализованные на основе источника напряжения гораздо более распространены из-за их меньшей стоимости.

Управление силовым преобразователем в составе STATCOM позволяет генерировать на его выходе напряжение произвольной формы, и добавлять в узел сети ток таким образом, чтобы контролировать параметры напряжения сети. Таким образом, STATCOM может использоваться для:

- стабилизации напряжения, которая осуществляется динамической компенсацией реактивной мощности;
- восстановления синусоидальной формы токов и напряжений в узле сети;
- устранения несимметрии напряжений в узле сети.

Кроме того, возможна установка батарей конденсаторов большой ёмкости, либо аккумуляторных батарей в ЗПТ STATCOM, что позволяет также использовать STATCOM при аварийных режимах сети в качестве бесперебойного источника питания.

1.4.2 Вольтодобавочные трансформаторы

Вольтодобавочные трансформаторы (ВДТ) создают возможность ступенчатого изменения мощности в широких пределах, за счет повышения напряжения, обычно на следующий уровень напряжения, однако возможно и повышение в процентах от номинального. Изменение напряжения производится под нагрузкой за счет переключения контакторов. Применение ВДТ имеет ряд преимуществ, таких как повышение напряжения до экономически оптимального уровня при любом рабочем режиме, позволяет повысить надежность работы системы и стабилизировать ее работу. ВДТ могут быть регулируемые и нерегулируемые [33].

За счет повышения напряжения, можно увеличить передаваемую активную мощность потребителю. Согласно ГОСТу, увеличение напряжения возможно максимум на 10% от номинального на нагрузке. Таким образом, предел регулирования ВДТ осуществляется в пределах 10%, однако, падение

напряжения ввиду наличия полного сопротивления линии, может потребовать большего диапазона регулирования, зависящего от ее параметров.

ВДТ могут работать как на повышение напряжения, так и на понижение напряжения и могут иметь несколько ступеней трансформации. Одна обмотка устройства, включена последовательно с линией, в которой регулируется напряжение. Эта обмотка получает питание от вспомогательного трансформатора, первичная обмотка которого питается от сети или иного источника электроэнергии. Вторичная обмотка вольтодобавочного трансформатора должна быть изолирована на полное напряжение линии. В зависимости от фазы вторичного напряжения вольтодобавочного трансформатора напряжение сети U_1 может быть увеличено или уменьшено на величину напряжения вторичной обмотки U_2 трансформатора. Вторичное напряжение вольтодобавочного трансформатора следует выбирать так, чтобы при возможных колебаниях напряжения сети рабочая точка на внешней характеристике не выходила за пределы зоны стабилизации.

Вольтодобавочные трансформаторы целесообразно устанавливать во вторичные цепи трансформаторов, связывающих сети разных номинальных напряжений. Это обусловлено тем обстоятельством, что в указанных местах действие вольтодобавочных трансформаторов получается наиболее эффективным даже при изменении схемы сети каждой ступени трансформации. Установка их в сети меньшего напряжения может показаться более выгодной, поскольку в отдельных линиях может оказаться меньшей передаваемая активная мощность. Однако при этом могут возникать и некоторые нежелательные явления, такие, как появление уравнивающих токов в контурах сети одного напряжения, имеющих сравнительно малую протяженность. Эти уравнивающие токи могут вызвать

дополнительные потери энергии в большей степени, чем снижают потери энергии в неоднородном контуре [34,35].

Существует два вида ВДТ – с продольной компенсацией, и с поперечной. Вольтодобавочные трансформаторы с продольной компенсацией изменяют величину напряжения, а с поперечной компенсацией - фазу напряжения. У продольного ВДТ первичная обмотка питающего трансформатора включена на фазное напряжение, в расщелку той же фазы включена и вторичная обмотка последовательного трансформатора (рисунок 1.4.1). Угол сдвига ЭДС ΔE , наводимой во вторичной обмотке последовательного трансформатора может принимать значения 0 или 180 градусов, в зависимости от положения (слева или справа от средней точки) переключателя отпаяк питающего трансформатора. Напряжение на выходе ВДТ может быть выше (угол = 0, $\Delta E > 0$) или ниже (угол = 180°, $\Delta E < 0$) входного напряжения.

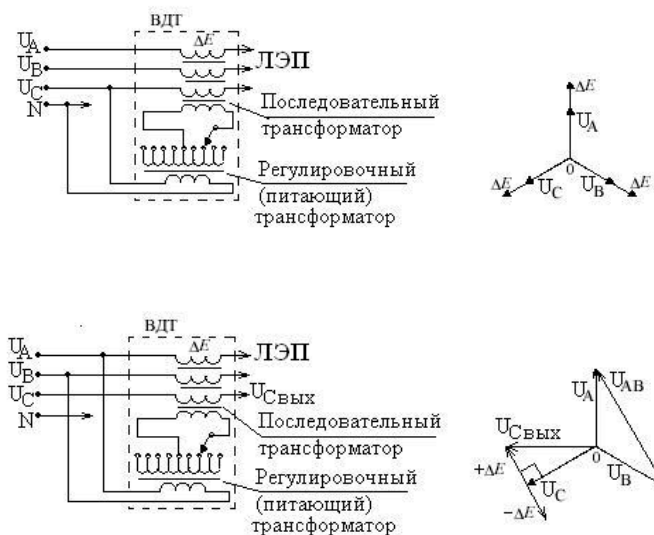


Рисунок 1.4.1 – Продольный и поперечный ВДТ

У поперечного ВДТ первичная обмотка питающего трансформатора включена на линейное напряжение (например, АВ, Рисунок 1.4.1). Вторичная обмотка последовательного трансформатора включена в расщелку третьей фазы (в данном случае это фаза С).

Это позволяет использовать их в системах с замкнутыми контурами для перераспределения потоков активной и реактивной энергии между отдельными элементами системы. В случае с повышением передаваемой активной мощностью, рассматривается только ВДТ с продольной компенсацией, в диссертации рассматривается только симметричная трехфазная линия электропередач.

Стоимость вольтодобавочных трансформаторов с поперечным и продольным регулированием значительно дороже, чем с одним из них и составляет 0,7 – 1,6 стоимости силового трансформатора аналогичной мощности. В связи с этим они, как правило, не применяются во вновь проектируемых электроустановках [36].

Для промышленных комплексов, где провалы напряжения происходят не только в установившемся режиме, из-за большого реактивного сопротивления магистральных линий, но и при больших пусковых токах электродвигателей, использование ВДТ является одним из надежных и распространенных решений. Особенно эффективно такое решение для нефтегазовых добычных промыслов, которые обусловлены высокой протяженностью линии, что дает значительное падение напряжений. При увеличении нагрузки, падение напряжение увеличится, уменьшая пропускную способность.

1.4.3 Продольная емкостная компенсация

Одним из способов повышения напряжения в распределительной сети предприятия является применение установок продольно-емкостной компенсации (УПК) [10]. Исходя из принципа работы установок продольно-емкостной компенсации [9], можно заключить, что устройство эффективно только при наличии большого индуктивного сопротивления линии и способно стабилизировать напряжение в отдельных точках системы электроснабжения.

Значительным недостатком УПК является необходимость защиты его конденсаторов от пусковых токов и токов короткого замыкания. Схема защиты УПК с шунтирующим тиристорным выключателем представлена на рисунке 2.4.2 [37].

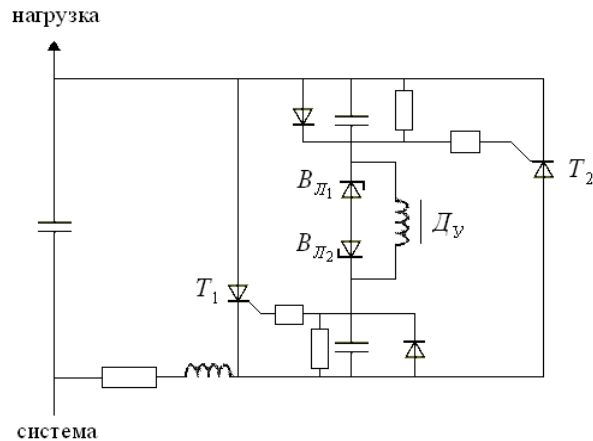


Рисунок 1.4.2 – Схема защиты УПК с шунтирующим тиристорным выключателем

Тиристорный выключатель предназначен прежде всего для защиты конденсаторов УПК от короткого замыкания в линии, где установка подключена. Тиристоры T_1 и T_2 открываются в случае достижения мгновенного значения напряжения на конденсаторах выше допустимого.

Охарактеризуем положительные и отрицательные стороны установок продольно-емкостной компенсации, применяемой в сетях среднего уровня напряжения.

Основными преимуществами УПК являются:

- автоматическая, безынерционная добавка напряжения;
- стабилизация напряжения в узлах нагрузки, вплоть до зажимов электроприемников;
- возможность размещения УПК в любой точке линии (в случае ее радиального исполнения)

Указанные преимущества особенно ярко проявляются при соотношении $X_{\text{л}}/R_{\text{л}} \gg 1$

Основными недостатками УПК являются:

- необходимость применения надежной защиты от коротких замыканий в линии [37]
- ограничение эффективности УПК в зависимости от конфигурации сети. УПК наиболее эффективны для радиальных линий и менее эффективны для магистральных;
- возможность возникновения субгармонических колебаний при неправильном выборе $X_{\text{упк}}$ по отношению к $X_{\text{л}}$ [38];
- большие габаритные размеры установки вследствие необходимости применения достаточно большого количества конденсаторов [38].

Таким образом, можно заключить, что УПК является достаточно эффективным средством повышения пропускной способности линии электропередач на среднем уровне напряжения. Однако, применение УПК ограничено рядом факторов, указанных в его недостатках.

1.4.4 Поперечно-емкостная компенсация

В настоящее время одним из самых распространённых способов увеличения передаваемой мощности является применение поперечной емкостной компенсации. В этом случае увеличение пропускной способности достигается компенсацией реактивной составляющей тока нагрузки [39–45]. При использовании поперечной компенсации необходимо учитывать, что наибольший эффект ее применения достигается при условии подключения конденсаторов как можно ближе к нагрузке [46]. Принципиальная схема подключения поперечной компенсации показана на рисунке 2.4.7.

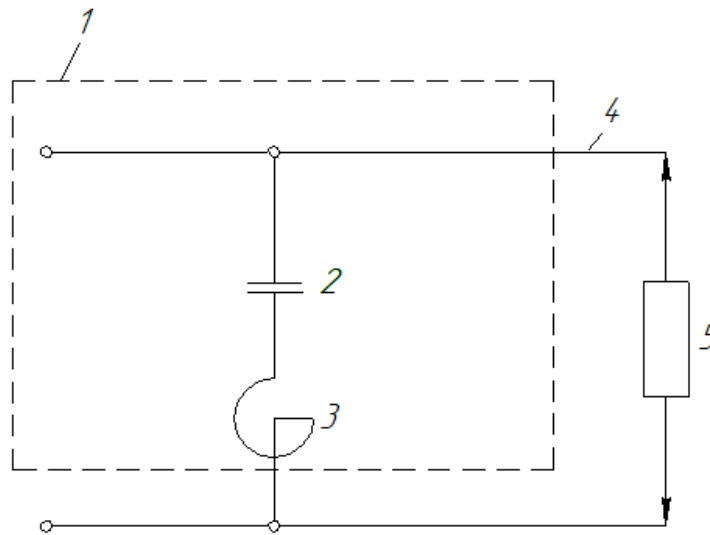


Рисунок 1.4.3 – Схема включения УПК (а) и схема замещения поперечной компенсации (б). Где 1 – устройство поперечной компенсации реактивной мощности, 2- конденсаторы устройства поперечной компенсации; 3 — реактор устройства поперечной компенсации, 4- линия электропередач, 5- нагрузка.

Очевидно, что для достижения заданного угла линии при переменной нагрузке, необходимо использовать регулируемую дискретно установку поперечной компенсации. Такие установки широко используются в сетях среднего напряжения [47].

Основными преимуществами поперечной компенсации являются:

- простота конструкции;
- обеспечения заданного значения $\text{tg}\varphi$ на входе системы электроснабжения предприятия;

К недостаткам следует отнести:

- зависимость генерации реактивной мощности от напряжения;
- относительно большие габариты;

Таким образом, можно заключить, что установки поперечной емкостной компенсации являются эффективным средством увеличения значений передаваемой мощности и актуальны для использования в распределительных сетях промышленных предприятий. В определенных случаях значение передаваемой мощности можно увеличить до его максимальных значений (пропускной способности). Следует отметить, что устройства продольной и поперечной компенсации зачастую применяются совместно. Этому посвящен ряд научных работ, в которых показана эффективность их совместного включения [48].

1.5 Изменение рода тока

Так как большинство распределительных сетей производственных комплексов работают на переменном токе, то проблема реактивного сопротивления, а также потребляемой реактивной мощности остается актуальной. Помимо уже предложенных способов компенсации реактивной мощности, предлагается перевод магистральной или, что чаще встречается, радиальной линии переменного тока на постоянный ток, при этом существует несколько технических решений, и все они предполагают изменение рода тока в уже существующих проводниках. Плюсом при таком переходе является то, что не требует замена опорных конструкций и проводников, требуется только установка инверторов и активных выпрямителей по обоим концам линии. Большая часть конечных потребителей (порядка 80%) питается постоянным током, особенно это актуально для промышленных комплексов. Самый яркий пример – это приводы электродвигателей, которые основаны на использовании частотных преобразователей, в составе которых содержится звено постоянного тока [49–53].

Во многих странах уже сейчас используются так называемые «вставки» постоянного тока, для передачи электроэнергии из одной энергосистемы в

другую. Вставкой постоянного тока соединены энергосистемы России и Финляндии. Станция состоит из четырех блоков, каждый из которых имеет мощность в 355 МВт. Также линии постоянного тока используются и для выгодной передачи электроэнергии внутри стран. На сегодняшний день существует целый ряд длинных линий электропередач по всему миру работающих на постоянном токе, в основном высокого класса напряжения (более 220 кВ). Линии электропередач на средних уровнях напряжения пока что не представлены в мире и существуют только в качестве универсальной шины для удобного и эффективного распределения энергии между группами приводов [54].

Выбор конкретного технического решения зависит от требований, которые предъявлены к питающей линии. Существует несколько топологий линий электропередач в составе распределительных сетей постоянного тока: униполярная, биполярная и триполярная. Выделяется возврат по земле и по проводникам. Все способы передачи разработаны для линий высокого напряжения, однако также могут быть применены для средних напряжений.

Рассмотрим каждую из них подробнее. Униполярная – простейшая из топологий линий электропередач постоянного тока. В униполярной передаче заземлен один из полюсов и имеется один провод, изолированный от земли. Возможна передача электроэнергии по двум проводам (с положительным и нулевым потенциалом). Такой заземленный второй провод применяется в тех случаях, когда недопустимо применение тока в земле (например, при вводах в крупные города) [55]. Как правило, одна цепь униполярной передачи может состоять из одного провода и земли или одного фазного и нулевого провода. Униполярные схемы применяются для передачи небольших мощностей до $100\div 200$ МВт на небольшие расстояния. Большие мощности на большие расстояния целесообразно передавать по биполярным схемам [56].

Биполярная схема представляет собой вариант классической топологии, где одна фаза используется в качестве проводника мощности в сторону потребителя, возврат осуществляется по проводу с другой полярностью. В нормальном режиме работы, третья фаза не задействована, но является резервом в случае обрыва проводника [57–60]. Условная схема такой топологии представлена на рисунке 1.5.1.

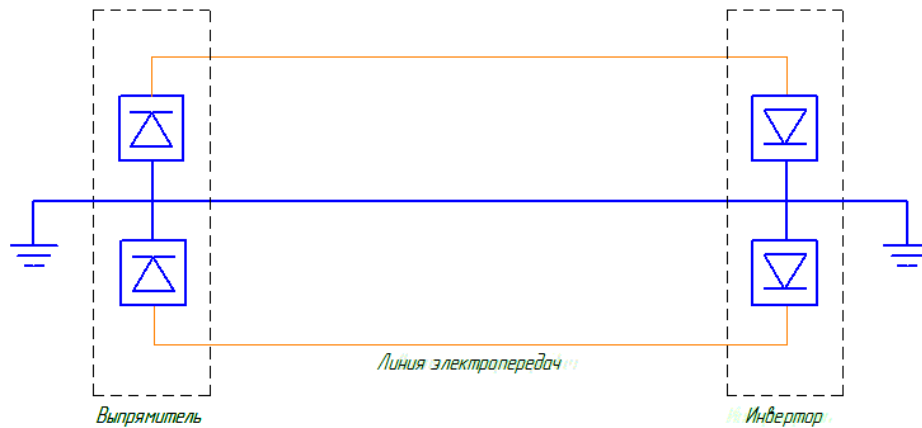


Рисунок 1.5.1 – Схема биполярной линии электропередач с резервной фазой

Второй вариант – триполярная линия электропередач (рисунок 1.6.2). В общем случае – это такая линия постоянного тока, где два и более проводника имеют одну полярность и имеют либо возврат по одному проводнику, либо по земле. Обычно прямая последовательность имеет отрицательную полярность [61–65].



Рисунок 1.5.2 – Схема триполярной линии

В зависимости от выбранной топологии, увеличивается передаваемая активная мощность модернизированной линии электропередач. Точные выходные данные зависят от конфигурации сети и элементов системы [66,67].

Несомненными плюсами в такой топологии являются отсутствие искажений тока и напряжения. Постоянный ток отлично подходит для кабельных линий. Протяженные кабельные линии имеют значительную емкость. Переменная ЭДС служит причиной возникновения токов для зарядки и разрядки этой емкости, что вызывает дополнительные потери мощности зарядный ток [68]. Эта проблема ярко выражена в высоковольтных сетях, однако актуальна и для средних уровней напряжения. Отсутствие явления емкостных кабельных токов способствует использованию в подводных кабельных линиях высокой мощности, например Балтийский Кабель длиной 250 км между Швецией и Германией работает на постоянном токе. В воздушных линиях за счет нулевой частоты, отсутствует индуктивное сопротивление, что положительно сказывается на уменьшении падения напряжения.

В дополнение, на сегодняшний день полупроводниковые приборы достигли большого прогресса, особенно это касается IGBT– транзисторов, которые имеют широкие ограничения по пропускной мощности (рисунок 1.5.3).

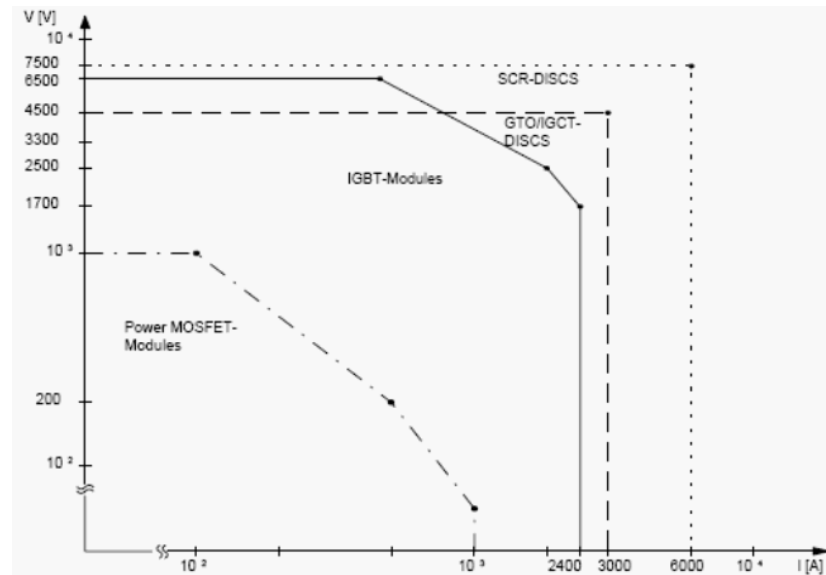


Рисунок 1.5.3 – Ограничения по току и напряжению IGBT–транзисторов некоторых моделей

Диапазон мощности позволяет использовать их в составе инверторов в распределительных сетях без понижения и напряжения, включая 35кВ [52,69]. За счет этого повышается КПД преобразователей. Трансформаторы имеют высокий КПД, близкий к 99%, тем не менее, уже два трансформатора с обеих сторон линии снижают эффективность передачи на 2%, которые выражаются в десятки киловатт мощности. Во вторых, стоимость трансформаторов среднего уровня напряжения, стремится к миллионам рублей, что сопоставимо со стоимостью преобразователей, хоть и остается в среднем более низкой.

Рассматривая возможность перевода сетей промышленных предприятий на постоянный ток, следует отметить, что такой способ увеличения пропускной способности потенциально является наиболее оптимальным за счет нивелирования проблем с реактивной мощностью в сетях. Так как магистральные и радиальные сети на подобных объектах – среднего напряжения, то их перевод на постоянный ток является актуальной задачей, так как подобные технические решения для промышленных объектов еще не были апробированы [70–73]. Следует отметить, что для

некоторых объектов изменение рода тока по триполярной схеме линии постоянного тока невозможно. Например, «Варгошерская» шахта по загазованности выделена в сверхкатегорную. Таким образом, категорически запрещается осуществлять передачу электроэнергии по земле, во избежание аварийной ситуации. Также исключается использование данного способа на нефтеперерабатывающих заводах, по схожим причинам.

Существует два важных недостатка для подобной системы: первый – высокая стоимость оборудования. Полупроводниковые преобразователи высокой эффективности все еще остаются новинкой на рынке и имеют высокую стоимость. Таким образом, их имплементация должна быть целесообразной с экономической точки зрения, так как если линия электропередач имеет небольшую протяженность, то возможно было бы эффективнее с экономической точки зрения построить параллельно ей новую линию электропередач, удвоив или утроив пропускную способность. Также еще одним важным недостатком считается защита линии электропередач. Большая часть видов защит размыкает контакты, когда переменный ток пересекает ноль. При постоянном токе такой вид защит не возможен, что приводит к необходимости использования дугогасящих устройств [74].

Немаловажным фактором является наличие искажений от преобразовательных устройств. Типичный ряд гармоник, который исходит от преобразователей составляет: 5, 7, 11, 13. В таблице 2 приведено типичное содержание в % гармоник тока в сети [75].

Таблица 1.5.1 – Процентное содержание гармоник в 6-ти и 12-ти пульсных выпрямителях.

Номер гармоники	6-ти пульсный выпрямитель	12-ти пульсный выпрямитель
1	100	100
5	20	-
7	14	-
11	9	9
12	8	8
17	6	-
19	5	-
23	4	4
23	4	4

В таком случае требуются фильтры для подавления наиболее ярко выраженных гармоник. Эффективность фильтра любой формы зависит от его реактивной мощности, точности настройки, и импеданса сети в точке подключения. Гармоники ниже частоты резонанса фильтра будут усиливаться. Схемотехника фильтра важна, чтобы быть уверенным в том что искажения не будут усиливаться до неприемлемых уровней [76–81]. Когда несколько различных порядков гармоник присутствуют в сети мы можем подавлять одни в то же время усиливая другие. Фильтр 7-ой гармоники создает параллельный резонанс на частоте 5-ой и усиливает ее, поэтому к фильтру 7-ой гармоники необходим фильтр 5-ой гармоники. Отсюда - часто необходимо использовать несколько фильтров, настроенных каждый на свою частоту. Это также сказывается на стоимости установки преобразователей.

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 1

В первой главе рассмотрены способы увеличения передаваемой активной мощности. Данная проблема считается актуальной, ввиду постоянного роста мощности потребителей. Особенно это касается промышленных горно- и нефтедобывающих комплексов, а также комбинатов

и перерабатывающих заводов. Был произведен анализ распределительных сетей на подобных объектах и сделан вывод о том, что подавляющее большинство подобных сетей работает на среднем уровне напряжения.

Был введен термин передаваемая активная мощность, который определяется из допустимого уровня тока и напряжения. Его максимальный уровень при данных условиях является пропускной способностью линии.

Способы повышения передаваемой активной мощности включали в себя два типа: с заменой проводников, либо строительством новой линии и без замены проводников, а только замену преобразовательных устройств и включение в цепь компенсирующих устройств. Следует отметить, что первая группа мер по повышению передаваемой активной мощности в данной диссертации рассматриваться в дальнейшем не будет, так как требует больших капитальных вложений и во многих случаях отключения потребителя на время модернизации распределительной сети.

Вторая группа способов позволяет совершать монтаж нового оборудования параллельно существующему оборудованию, и переключение потребует малых затрат времени. При достаточной протяженности линии, экономически целесообразно использовать один из предложенных способов (компенсация реактивной мощности, использование ВДТ, изменение рода тока с последующим выбором новой топологии распределительной сети). Однако каждый из предложенных методов имеет ограничение по пределу увеличения передаваемой активной мощности линии. Если такой предел ниже, чем требуемый прирост передаваемой активной мощности, то выбранный способ не подходит. При этом капиталовложения для каждого из рассматриваемых методов – варьируются в широких пределах и требуется определить наиболее целесообразный из них, в зависимости от параметров сети.

Были сделаны следующие выводы:

1. Обоснована актуальность повышения пропускной способности и передаваемой активной мощности линий электропередач для распределительных сетей среднего уровня напряжения электротехнических комплексов промышленных предприятий, обусловленная распространенностью сетей данного типа, а также связанными с ним возникающими проблемами;

2. Обосновано увеличение пропускной способности линии электропередач без внесения конструктивных изменений в СЭС, а именно без увеличения замены проводов или строительства дополнительной линии;

3. Проанализированы способы повышения передаваемой активной мощности линии распределительной сети переменного тока, средствами компенсации реактивной мощности нагрузки и реактивного сопротивления линии электропередач, а именно устройствами продольной и поперечной компенсации, а также вольто-добавочными трансформаторами;

4. Проанализированы способы повышения передаваемой активной мощности линии электропередач распределительной сети электротехнического комплекса за счет изменения рода тока.

Исходя из этого, формируются цель и задачи исследования:

Цель исследования: Повышение передаваемой активной мощности в распределительной сети переменного тока среднего уровня напряжения электротехнического комплекса предприятий путем обоснованного выбора наиболее эффективного технического решения.

Задачи исследования:

1. Анализ существующих способов повышения передаваемой активной мощности распределительных сетей переменного тока.

2. Определение зависимостей передаваемой переменным и постоянным током активной мощности от параметров распределительной сети предприятия и его нагрузки.

3. Разработка критериев, обеспечивающих обоснованный выбор способа повышения передаваемой активной мощности в распределительной сети.

4. Выявление наиболее эффективных по разработанному критерию способов перевода линии электропередачи на постоянный ток.

5. Оценка эффективности применения предлагаемых способов повышения передаваемой активной мощности в эксплуатируемых распределительных сетях промышленных предприятий.

ГЛАВА 2 СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ПЕРЕДАВАЕМОЙ В НАГРУЗКУ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

2.1 Передаваемая в нагрузку активная мощность

В работе принято допущение, что при наличии гармоник в напряжении и токе, они должны быть скомпенсированы до допустимых ГОСТ-ом величин. В этом случае погрешность определения мощности без учета гармоник составляет менее 1%. Отсюда следует, что дальнейшее исследование правомерно проводить при условии синусоидальности режима напряжения и тока.

Передаваемая в нагрузку через распределительные сети полная мощность включает в себя активную и реактивную составляющие:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (2.1.1)$$

И активная и реактивные мощности можно разделить на мощности потерь в линии электропередач (P_L, Q_L) и мощности, потребляемые нагрузкой (P_H, Q_H). Таким образом:

$$P = P_L + P_H; Q = Q_L + Q_H. \quad (2.1.2)$$

Наибольшая передаваемая активная мощность в нагрузку означала бы $P = P_H, Q = 0$. Потери активной мощности в линии P_L связаны с активным сопротивлением линии R_L , которое в свою очередь зависит от свойств проводника, условий окружающей среды и др. В данном разделе мы принимаем R_L независимой величиной. Тогда наибольший интерес при повышении передаваемой активной мощности вызывает уменьшение реактивной мощности, потребляемой нагрузкой – Q_H , а также уменьшение

реактивной мощности линии, вызванной её реактивным сопротивлением X_L . Следует отметить, что понятие «линия» в данной диссертации обозначает линию электропередач распределительной сети промышленного предприятия.

Потребление нагрузкой полной мощности приводит к потерям активной мощности в линии электропередач распределительной сети электротехнического комплекса при линейном напряжении U_2 :

$$P_L = R_L \frac{S_H^2}{U_2^2} = R_L \frac{P_H^2 + Q_H^2}{U_2^2} = \frac{R_L P_H^2}{U_2^2} + \frac{R_L Q_H^2}{U_2^2}. \quad (2.1.3)$$

Как видно из выражения 2.1.3, потери активной мощности в линии электропередач зависят как от активной, так и реактивной мощности, передаваемой в нагрузку. Если считать, что нагрузка потребляет постоянную активную мощность: $P_L = \text{const}$, то передаваемую в нагрузку активную мощность можно выразить в относительных единицах следующим образом:

$$P_H \% = \frac{P - P_L}{P}. \quad (2.1.4)$$

Здесь P – активная мощность на входе энергосистемы.

Соотношение между активной и реактивной мощностью, потребляемой нагрузкой, определяется углом сдвига между током и напряжением φ_H . Коэффициент мощности в синусоидальном режиме:

$$\cos \varphi_H = \frac{P_H}{S_H} = \frac{P_H}{\sqrt{P_H^2 + Q_H^2}}. \quad (2.1.5)$$

Тогда потери мощности в линии, связанные с потреблением нагрузкой реактивной мощности, могут быть выражены через коэффициент мощности следующим образом:

$$P_L = \frac{P_H^2 R_L}{U_2^2 \cos^2 \varphi_H}. \quad (2.1.6)$$

Другой характерной величиной является тангенс угла нагрузки, определяющий соотношение между активной и реактивной мощностью, отдаваемой в нагрузку:

$$\operatorname{tg} \varphi_H = \frac{Q_H}{P_H}. \quad (2.1.7)$$

Так как передаваемая в нагрузку активная мощность связана с напряжением на зажимах нагрузки, то следует также рассмотреть потери напряжения, вызванные активным и реактивным сопротивлениями линии R_L , X_L . Потери напряжения ΔU на участке линии выражается следующим образом:

$$\Delta U = \frac{P_H R_L + Q_H X_L}{U_2}. \quad (2.1.8)$$

Здесь U_2 – напряжение в конце линии. Тогда в начале линии напряжение примет значение:

$$U_1 = U_2 + \Delta U = U_2 + \frac{P_H R_L + Q_H X_L}{U_2} = \frac{U_2^2 + P_H R_L + Q_H X_L}{U_2}. \quad (2.1.9)$$

Выразим мощность, передаваемую в нагрузку:

$$U_1 U_2 = U_2^2 + P_H R_L + Q_H X_L \rightarrow$$

$$P_H = \frac{U_1 U_2 - U_2^2 - Q_H X_L}{R_L}. \quad (2.1.10)$$

Заменим $Q_H = P_H \operatorname{tg} \phi_H$ $Q_H = P_H \operatorname{tg} \phi_H$ и $X_L = R_L \operatorname{tg} \phi_L$:

$$P_H R_L = U_1 U_2 - U_2^2 - P_H \operatorname{tg} \varphi_H R_L \operatorname{tg} \varphi_L \rightarrow$$

$$P_H = \frac{U_1 U_2 - U_2^2}{R_L (1 + \operatorname{tg} \varphi_H \operatorname{tg} \varphi_L)} = \frac{U_2 \Delta U}{R_L (1 + \operatorname{tg} \varphi_H \operatorname{tg} \varphi_L)}. \quad (2.1.11)$$

Из формулы 2.1.11 видно, что передаваемая в нагрузку активная мощность будет максимальной при выполнении хотя бы одного из условий:

$\operatorname{tg} \varphi_H = 0$, что достигается при полной компенсации реактивной мощности, потребляемой нагрузкой, $Q_H = 0$;

$\operatorname{tg} \varphi_L = 0$, что достигается при полной компенсации реактивного сопротивления линии, $X_L = 0$.

Тогда максимальная передаваемая мощность вычисляется следующим образом:

$$P_H = \frac{U_2 \Delta U}{R_L}. \quad (2.1.12)$$

Согласно [22] предельные отклонения напряжения в узлах сети не должны превышать $\pm 10\%$. Тогда максимально допустимые режимы работы линии могут быть достигнуты при $U_1 = 1.1 U_H$ и потери падении напряжения в линии электропередач распределительной сети $\Delta U_1 = 0.2 U_H$. Максимальная передаваемая мощность при таких условиях:

$$P_H = \frac{0.18 U_H^2}{R_L}. \quad (2.1.13)$$

Рассмотрим возможное изменение передаваемой мощности при вариации значений $\operatorname{tg} \varphi_H$ и $\operatorname{tg} \varphi_L$.

Примем в выражении (2.1.13) величину $\frac{0.18U_n^2}{R_n}$ за единицу, что соответствует максимальному значению передаваемой мощности. Тогда доля фактически переданной в нагрузку активной мощности в зависимости от значений $tg\varphi_n$ и $tg\varphi_n$ вычисляется следующим образом:

$$P_n^* = \frac{1}{1 + tg\varphi_n tg\varphi_n}. \quad (2.1.14)$$

На рисунке 2.1.1 представлено семейство характеристик зависимостей пропускной способности линии в относительных единицах от тангенса угла линии электропередач распределительной сети и тангенса угла нагрузки, к которой она присоединена.

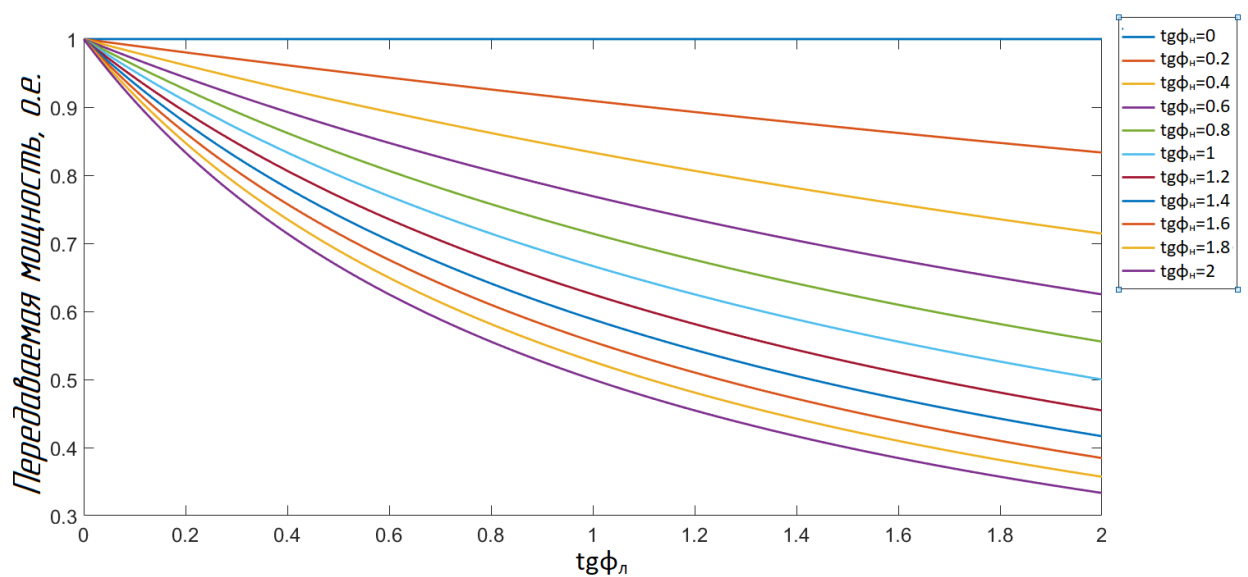


Рисунок 2.1.1 – Зависимость пропускной способности линии от тангенса угла линии электропередач и тангенса угла нагрузки

Диапазон изменения параметров нагрузки и линии представляющий собой реальное их соотношение принят следующим: $tg\varphi_n = 0 \div 1$; $tg\varphi_n = 0 \div 2$

Как видно из графиков, при больших значениях $tg\varphi_n = 1$ и $tg\varphi_n = 2$, фактически передаваемая в нагрузку мощность может быть в 3 раза меньше по сравнению с пропускной способностью линии $P_n^* = 1$, чем и обусловлена

актуальность применения устройств продольной компенсации для уменьшения значений $tg\varphi_{\text{л}}$ и/или устройств поперечной компенсации для уменьшения $tg\varphi_{\text{н}}$.

В разделе была получена формула для определения передаваемой мощности линии в зависимости от тангенса угла линии и тангенса угла нагрузки. Полученная формула позволяет определить максимальное значение передаваемой активной мощности линии при равенстве тангенса угла нагрузки или тангенса угла линии нулю.

Таким образом, в работе выявлена зависимость передаваемой активной мощности линии от ее параметров и параметров нагрузки. Определено, что максимальное значение передаваемой мощности линий, при реальном изменении $tg\varphi_{\text{н}}$ и $tg\varphi_{\text{л}}$ может быть увеличено в три раза по сравнению с минимальным значением передаваемой активной мощности.

2.2 Компьютерная модель линии электропередач распределительной сети промышленного предприятия и нагрузки

При изменении параметров линии либо нагрузки, приведённые в разделе 2.1 расчеты, позволяющие определить фактическую и максимальную передаваемую в нагрузку мощность, необходимо производить заново. Для частичной автоматизации данного процесса в среде имитационного моделирования MATLAB/Simulink была построена модель линии электропередач с подключенной нагрузкой, которая позволяет для заданных параметров $U_2, \Delta U, R_{\text{л}}, X_{\text{л}}$ определить передаваемую в нагрузку мощность $P_{\text{н}}$.

Модель построена на основе блоков из библиотеки SimPower Systems, предназначенной для моделирования энергосистем. Структурная схема модели линии с нагрузкой представлена на рисунке 2.2.1.

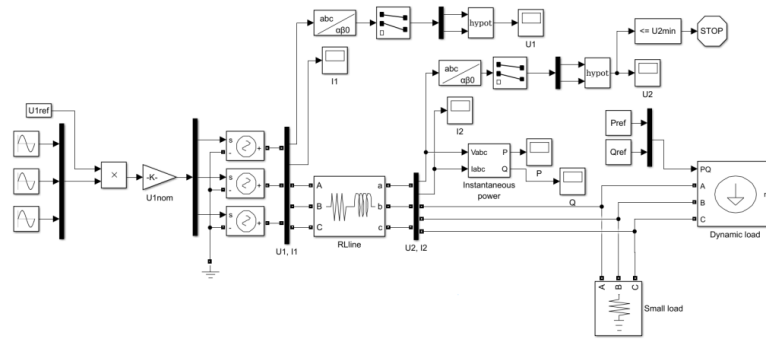


Рисунок 2.2.1 – Структурная схема компьютерной модели нагрузки, подключенной к сети через линию электропередач

Модель содержит:

- блок формирования синусоидальных сигналов фазных напряжений;
- блок управляемых генераторов фазных напряжений сети;
- блок моделирования линии электропередач распределительной сети в виде последовательной RL-цепи с настраиваемыми значениями R и L;
- блоки оценки амплитудного значения напряжения на входе и выходе линии;
- блок оценки потребляемой нагрузкой активной и реактивной мощности;
- блок динамической нагрузки, моделируемый управляемыми источниками тока;
- блок дополнительной нагрузки, необходимость наличия которого обусловлена особенностями моделирования источников тока в среде Simulink.

Напряжение на входе и выходе линии приводится к пространственному вектору на плоскости в ортогональной системе координат с помощью преобразования Кларка [82]:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \\ u_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \mathbf{E} \cdot \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix}. \quad (2.2.1)$$

Здесь u_α , u_β – проекции напряжений на оси координатной системы $\alpha\beta$; u_a , u_b , u_c – мгновенные значения фазных напряжений сети; u_0 – компонент нулевой последовательности, существующий только в несимметричной системе.

На основании проекций u_α , u_β вычисляется амплитуда U и фаза θ вектора напряжения сети:

$$U = \sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2}; \theta = \arctan 2 \left(\frac{u_\beta}{u_\alpha} \right). \quad (2.2.2)$$

Подход с использованием пространственного вектора позволяет для симметричной системы синусоидальных напряжений в каждый момент времени оценить амплитуду фазных напряжений при отсутствии задержек, которые могли бы быть внесены при использовании алгоритмов оценки среднеквадратичного его значения либо преобразования Фурье.

По полученным значениям активной и реактивной мощности вычисляются мгновенные значения активных и реактивных токов, потребляемых нагрузкой при вычисленной амплитуде напряжения на входе:

$$\begin{cases} i_a = \frac{P}{U} \cos \theta + \frac{Q}{U} \cos \left(\theta - \frac{\pi}{2} \right); \\ i_b = \frac{P}{U} \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + \frac{Q}{U} \cos \left(\theta - \frac{7\pi}{6} \right); \\ i_c = \frac{P}{U} \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) + \frac{Q}{U} \cos \left(\theta - \frac{\pi}{6} \right). \end{cases} \quad (2.2.3)$$

Вычисленные по 2.2.3 мгновенные значения токов используются как задающие сигналы для управляемых источников тока, таким образом, моделируя нагрузку с возможностью управлять потреблением активной и реактивной мощности.

Приведём один из возможных сценариев использования данной модели, а также сверим результаты моделирования с расчётами, приведёнными в разделе 2.1. Рассмотрим оценку пропускной способности линии с помощью предложенной модели. В качестве исходных данных для моделирования приняты следующие условия.

Сеть представлена идеальным источником ЭДС без внутреннего сопротивления: $Z_{вх}=0$; $U=6$ кВ.

Линия представлена чисто активным сопротивлением $\operatorname{tg} \varphi_n = 0$: $R_n = 0.1$ Ом; $X_n = 0$ Ом.

Диапазон допустимого изменения напряжений: $U = 0.9 \div 1.1$ о.е.

Нагрузка потребляет чисто активную мощность: $\operatorname{tg} \varphi_n = 0$.

Для определения пропускной способности линии аналитически, подставим исходные данные в (2.2.3). Тогда:

$$P_n = \frac{U_2 \cdot (U_1 - U_2)}{R_n} = \frac{0.9 \cdot 6000 \cdot (1 - 0.9) \cdot 6000}{0.1} = 64.8 \text{ МВт.} \quad (2.2.4)$$

Теперь определим P_n с помощью предложенной модели. Исходные параметры линии ($R_n = 0.1$ Ом, $L = 0$ Гн) устанавливаются в блоке RLline.

Для управляемых источников напряжения задаётся амплитудное значение фазных напряжений $U_{1\phi} = 1.1 \cdot 6000 \cdot \sqrt{2} / \sqrt{3} = 5144$ В. Для оценки пропускной способности потребляемая нагрузкой активная мощность P_n плавно увеличивается по линейному закону, пока амплитуда напряжения на стороне

нагрузки не уменьшится до значения $U_2=0.9U_n$, после чего процесс моделирования останавливается, а значение P_n на момент остановки приобретает значение пропускной способности линии. Для данного сценария принят следующий закон изменения потребляемой активной мощности: P_n увеличивается со значения 5 МВт на 1 МВт/с.

Полученные при моделировании диаграммы изменения активной мощности, а также напряжения на входе и выходе линии электропередач в относительных единицах, представлены на рисунке 2.2.2.

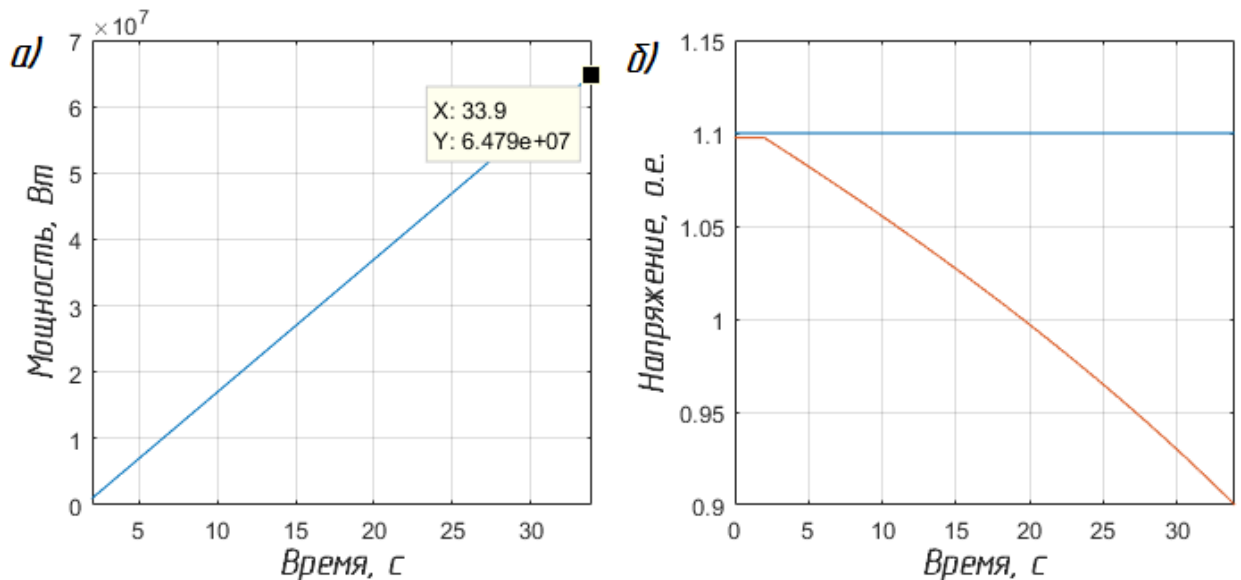


Рисунок 2.2.2 – Диаграммы изменения активной мощности (а) и напряжения на входе и выходе линии электропередач (б), полученные с помощью разработанной компьютерной модели

Как видно из диаграмм, когда напряжение на выходе линии опускается до 90%, потребляемая нагрузкой активная мощность составляет **34.27 МВт**.

Таким образом, в разделе представлена компьютерная модель линии с динамической нагрузкой, позволяющая определять как пропускную способность, так и фактическую передаваемую в нагрузку мощность при известных параметрах активного и реактивного сопротивления линии, а

также активной и реактивной мощности, потребляемой нагрузкой. Абсолютная погрешность между пропускной способностью, вычисленной с помощью компьютерной модели, и вычисленной аналитически согласно разделу 2.1, составила 0.07 МВт, что подтверждает адекватность модели.

2.3 Адаптация модели к статическим характеристикам нагрузки

2.3.1 Учёт статических характеристик нагрузки

Выражение 2.1.11 и модель, предложенная в разделе 2.2, позволяют определить пропускную способность линии для конкретных значений P_n , Q_n , U_2 , U_1 , R_L , X_L . Данная формула работает исходя из допущения, что $\operatorname{tg} \varphi_n$ является постоянной величиной, однако, в реальных энергосистемах потребляемая нагрузкой активная и реактивная мощность изменяются во времени и зависят от напряжения в точке подключения нагрузки к сети. В общем случае зависимости активной и реактивной мощности от напряжения описываются с помощью статических характеристик нагрузки.

Статические характеристики нагрузки для распределительных сетей предприятий чаще всего строятся на основе экспериментально полученных данных о потреблении активной и реактивной мощности нагрузкой в определённый момент времени, при изменении напряжения на питающей подстанции.

В исследовании используются экспериментальные данные, полученные с Энергообъекта ОАО «Сясьский ЦБК», находящегося в операционной зоне филиала ОАО «СО ЕЭС» ОДУ Северо-Запада. Экспериментальные данные о потребляемых объектом активной и реактивной мощностях были сняты при диапазоне изменения напряжения $0.925 \div 1.075 U_n$ на шинах 6кВ. Полученные данные представляют собой массив данных, состоящий из следующих элементов: $[U_n; P_n; Q_n]$. Для учёта такого ряда данных в моделях зачастую используется линейная интерполяция, позволяющая определять промежуточные значения P_n и Q_n между известными дискретными

значениями. Однако, ввиду наличия стохастических факторов при проведении измерений, рекомендуется использование полиномиальной аппроксимации, позволяющей представить дискретный ряд данных в виде полинома n -ой степени. В контексте данного исследования полином второй степени даёт достаточное приближение.

Для аппроксимации ряд данных был импортирован в среду MATLAB, после чего коэффициенты полинома были определены с помощью функции $[p,S]=polyfit(X,Y,n)$ – возвращающей вектор p размерности $n+1$, который содержит коэффициенты аппроксимирующего полинома, соответственно $p_1, p_2 \dots p_{n+1}$, причем коэффициент полинома p_1 соответствует аргументу функции имеющему высшую степень, а p_{n+1} – является постоянной составляющей полинома.

С помощью функции *polyfit* был получен следующий вид полиномиальной регрессии:

$$\begin{aligned} P_n \approx P_{ном} \cdot \left(1.3993 - 1.4361 \frac{U_2}{U_n} + 1.0368 \cdot \left(\frac{U_2}{U_n} \right)^2 \right); \\ Q_n \approx Q_{ном} \cdot \left(2.8918 - 5.1876 \frac{U_2}{U_{ном}} + 3.2958 \cdot \left(\frac{U_2}{U_n} \right)^2 \right). \end{aligned} \quad (2.3.1)$$

Для ОАО «Сясьский ЦБК» номинальные значения мощности соответствовали $P_{ном}=102$ МВт, $Q_{ном}=105$ Мвар. Полученные статические характеристики представлены на рисунке 2.3.1, при этом точками обозначены значения, полученные в результате эксперимента, а сплошной линией – кривая, аппроксимирующая СХН в виде (2.3.1).

Учёт статических характеристик в модели производится с помощью связи входов P_{ref} , Q_{ref} блока нагрузки Dynamic load с вычисленной амплитудой напряжения через (2.3.1). Структурная схема модели с учётом полиномиальной аппроксимации статических характеристик нагрузки представлена на рисунке 2.3.1.

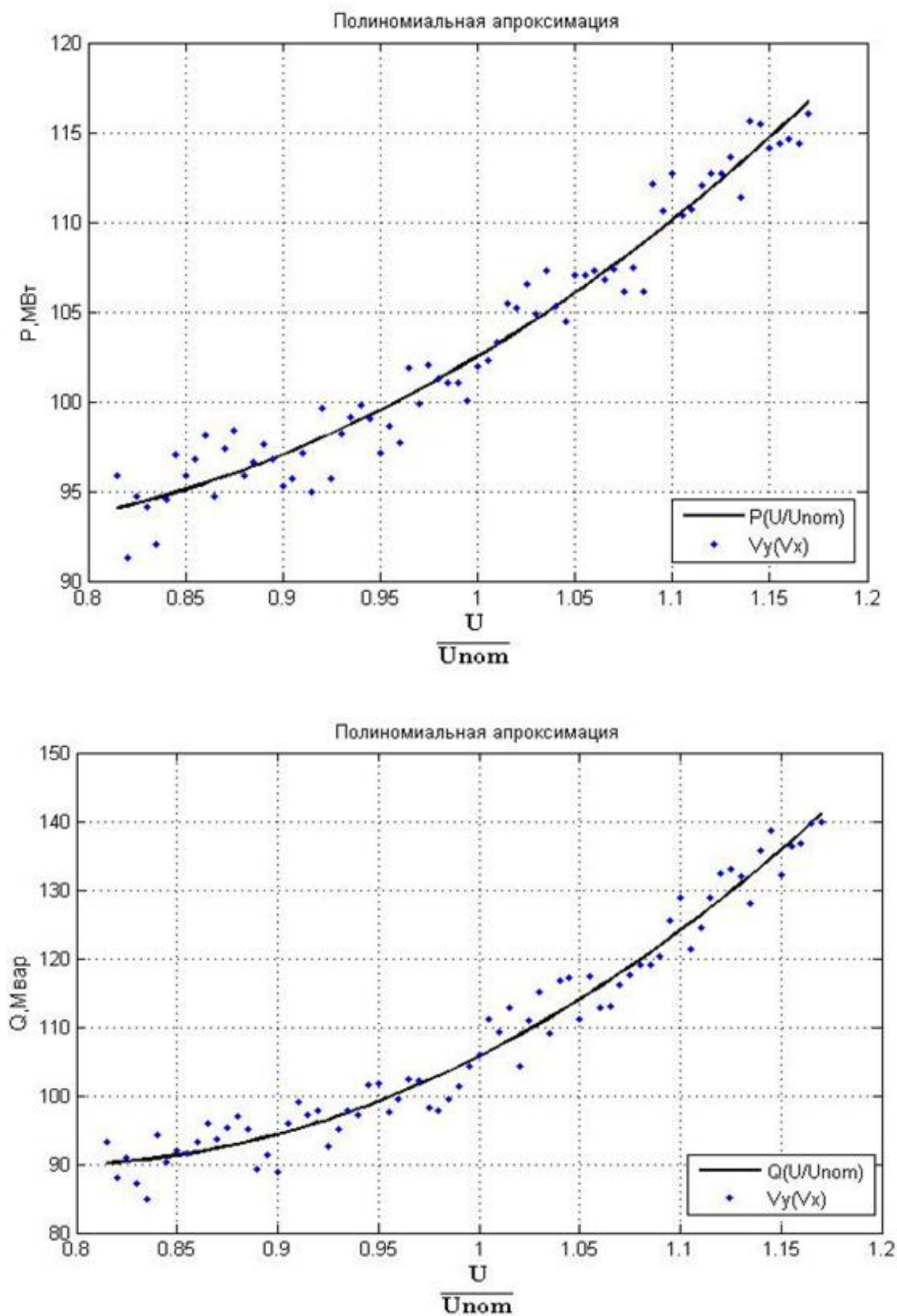


Рисунок 2.3.1 – Статические характеристики нагрузки, полученные из экспериментальных данных с Энергообъекта ОАО «Сясьский ЦБК» с помощью полиномиальной аппроксимации

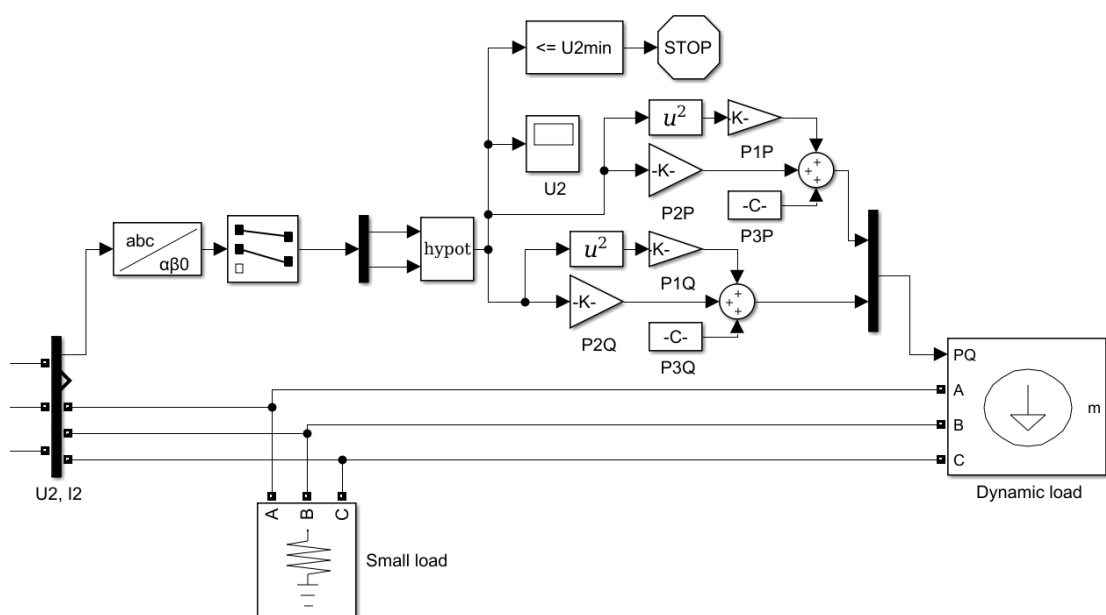


Рисунок 2.3.2 – Структурная схема модели нагрузки, реализованной с учётом статических характеристик нагрузки

В разделе был реализован учёт статических характеристик нагрузки в разработанной модели для оценки передаваемой активной мощности и пропускной способности линии. Учёт статических характеристик позволяет более точно определять потребляемую нагрузкой активную мощность при изменении напряжения на зажимах нагрузки, в том числе при падении напряжения на сопротивлении линии.

2.3.2 Итерационный расчёт параметров сети с одновременным учётом статических характеристик нагрузки и внутреннего импеданса сети

Следующее допущение связано с тем, что $U_1 = \text{const}$ и не зависит от передаваемой в нагрузку мощности. Однако, в реальных системах линия питается от источника конечной мощности, напряжение которого на выходе определяется следующим образом:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_{xx} - \dot{I}_1 R_c + jX_c \dot{I}_1 \approx \dot{U}_{xx} - \dot{I}_1 Z_c \quad (2.3.2)$$

Здесь: $\dot{U}_{xx}$ – напряжение холостого хода источника конечной мощности; $\dot{I}_1$ – ток на входе линии; R_c , X_c – активное и реактивное

внутреннее сопротивление эквивалентного источника конечной мощности соответственно, которые зависят от параметров энергосистемы перед линией – мощности питающих генераторов, параметров трансформаторов и магистральных линий электроснабжения и т.д. Токи и напряжения записаны в комплексной форме.

Элементы такой схемы удобно представлять в виде соединения двухполюсников и четырёхполюсников [83]. Запишем в матричном виде уравнения, связывающие напряжение на входе и выходе линии:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{\text{л}} & B_{\text{л}} \\ C_{\text{л}} & D_{\text{л}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix}. \quad (2.3.3)$$

Здесь $A_{\text{л}}$, $B_{\text{л}}$, $C_{\text{л}}$, $D_{\text{л}}$ – коэффициенты линии, представленной в виде четырёхполюсника в виде П-образной схемы замещения.

Перепишем уравнение 2.3.2 с учётом 2.3.3:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{\text{л}} & B_{\text{л}} \\ C_{\text{л}} & D_{\text{л}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix}. \quad (2.3.4)$$

Статические характеристики нагрузки в каждый момент времени связывают потребляемый нагрузкой ток с напряжением на выходе линии: $\dot{I}_2 = f(\dot{U}_2)$. В то же время при изменении потребляемой активной и реактивной мощности изменяется $\dot{U}_1$, что в свою очередь приводит к изменению значения $\dot{U}_2$.

Таким образом, для достижения равновесия в системе 2.3.4 необходимо итерационно пересчитывать значения $\dot{U}_1$, $\dot{U}_2$, $\dot{I}_2$ до тех пор, пока величина ΔU между двумя итерациями не упадёт ниже определённого значения – допустимой погрешности.

Блок-схема итерационного процесса расчёта представлена на рисунке 2.3.3. Среда Simulink изначально построена на принципе итерационного решения системы дифференциальных уравнений, что позволяет с минимальными доработками адаптировать модель из раздела 2.2 для учёта статических характеристик нагрузки и внутреннего импеданса эквивалентного источника конечной мощности, которым смоделирована сеть.

Структурная схема модели с учётом статических характеристик нагрузки и внутреннего сопротивления источника конечной мощности представлена на рисунке 2.3.3.

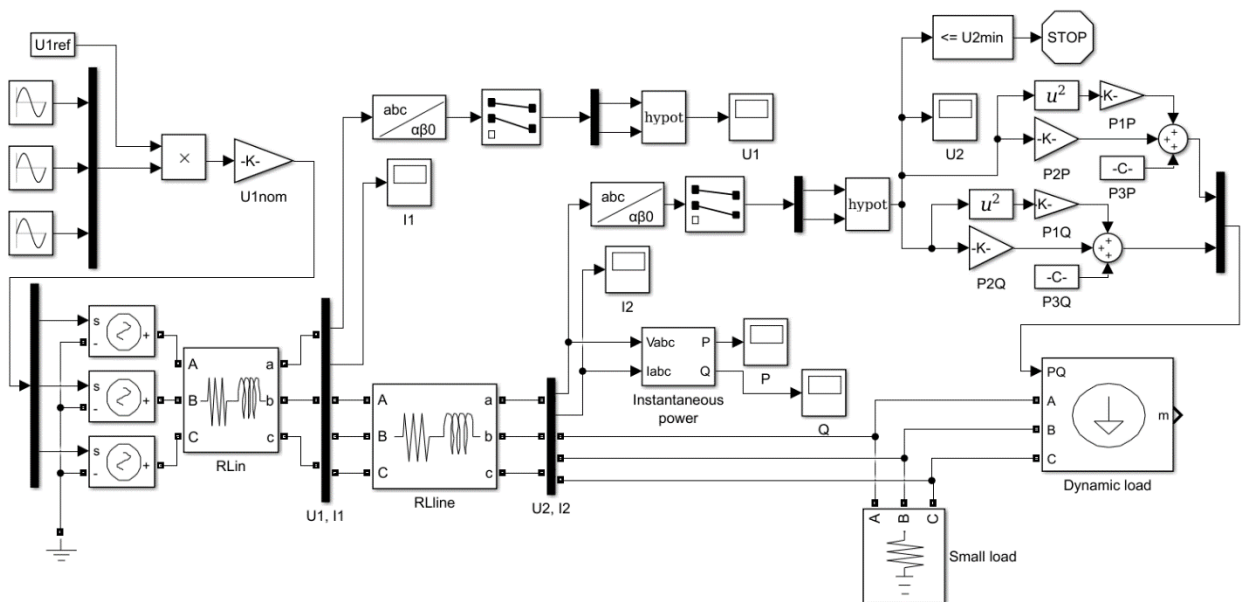


Рисунок 2.3.3 – Структурная схема компьютерной модели нагрузки, подключенной к сети, с учётом её внутреннего импеданса, а также статических характеристик нагрузки

Результаты моделирования при плавном изменении напряжения сети в пределах 0.9-1.1 представлены на рисунке 2.3.4.

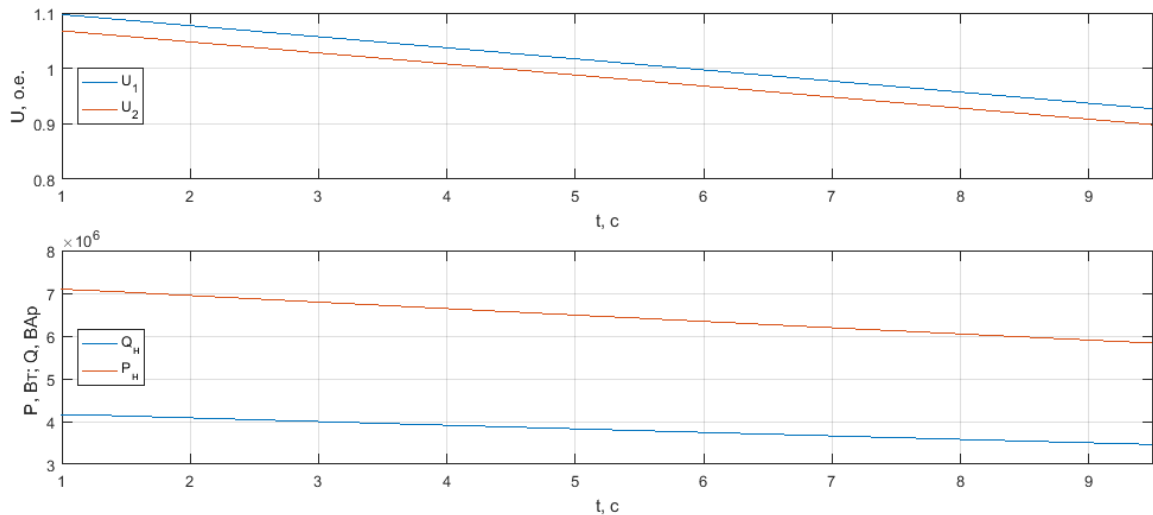


Рисунок 2.3.4 – Диаграммы передаваемой в нагрузку активной и реактивной мощности при изменении напряжения на входе линии в допустимых пределах

Из полученных графиков видно нелинейное изменение мощности на стороне нагрузки при линейном изменении напряжения на её зажимах, что обусловлено учётом статической характеристики нагрузки.

В разделе было показано, что при учёте статических характеристик нагрузки, а также при представлении сети в виде источника конечной мощности, необходимо реализовать итерационный алгоритм расчёта передаваемой в нагрузку активной мощности. Показано, что для решения данной задачи подходит среда Simulink, моделирование в которой осуществляется с помощью итерационного процесса поиска решения дифференциальных уравнений. Данная особенность позволила с минимальными изменениями адаптировать модель, разработанную в разделе 2.3.1 для учёта статических характеристики и внутреннего импеданса сети.

2.3.3 Оценка ошибки определения передаваемой мощности без учёта статических характеристик

Учёт статических характеристик нагрузки позволяет определить фактически передаваемую в нагрузку мощность при различных уровнях

напряжения на зажимах нагрузки. Тогда целесообразно определить значение среднеквадратичной ошибки по вычисленной передаваемой мощности без учёта статических характеристик, которая может быть определена следующим образом:

$$\delta_p = \frac{\sqrt{\sum (P_{\text{ном}}^2 - P_{\text{ном}}^2)}}{P_{\text{ном}}}. \quad (2.3.5)$$

Выражение 2.3.2 справедливо для питания нагрузки напрямую источником бесконечной мощности, однако для оценки передаваемой в нагрузку мощности через линию электропередач выражение 2.3.2 необходимо записать с учётом выражения 2.1.11. Выразим активную и реактивную мощность, определённую с учётом статической характеристики следующим образом:

$$P_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} k_p, \quad Q_{\text{ном}} = Q_{\text{ном}} k_Q. \quad (2.3.6)$$

Здесь k_p , k_Q – коэффициенты пропорциональности статической характеристики, зависящие от уровня напряжения и получаемые при приведении выражения 2.3.1 к относительным единицам:

$$\begin{aligned} k_p &= \frac{P_{\text{ном}}}{P_{\text{ном}}} = 1.3993 - 1.4361 \frac{U_2}{U_n} + 1.0368 \cdot \left(\frac{U_2}{U_n} \right)^2; \\ k_Q &= \frac{Q_{\text{ном}}}{Q_{\text{ном}}} = 2.8918 - 5.1876 \frac{U_2}{U_n} + 3.2958 \cdot \left(\frac{U_2}{U_n} \right)^2. \end{aligned} \quad (2.3.7)$$

Тогда ошибка определения передаваемой через линию в нагрузку активной мощности без учёта статических характеристик может быть вычислена следующим образом:

$$\delta_P = \frac{\sqrt{\sum \left(\frac{P_{ном} \cdot (-k_P \cdot U_2 \cdot (U_1 - U_2))}{R_L \left(1 + \frac{Q_{ном} \cdot k_Q \cdot U_2}{P_{ном} \cdot k_P \cdot U_2} \cdot \tan \varphi_L \right)} \right)}}{P_{ном}}. \quad (2.3.8)$$

Вычисленное значение δ_P будет варьироваться в зависимости от напряжения на выходе линии. Целесообразно определить максимальную величину ошибки при работе нагрузки с различными уровнями напряжений на входе, входящих в диапазон допустимых напряжений, т.е. $U_1, U_1 \in [0.9; 1.1] U_{ном}$. В среде MATLAB была определена максимальная ошибка, полученная из решения выражения 2.3.5 на допустимом диапазоне напряжений, и при заданных в разделе 2.3.1 значениях мощности:

$$\delta_{P_{max}} = \max | \delta_P | = 13.23\%. \quad (2.3.9)$$

Значение $\delta_{P_{max}}$ может быть также получено при помощи разработанной модели без вычисления выражения 2.3.5. Для этого были реализованы два сценария моделирования: при задании $P_{ref} = P_{ном}; Q_{ref} = Q_{ном}$ и при $P_{ref} = P_{ном} \cdot k_P(U_2); Q_{ref} = Q_{ном} \cdot k_Q(U_2)$, при k_P, k_Q реализованы как было показано в разделе 2.3.2. В ходе моделирования напряжение на входе линии плавно изменяется с 1.1 до 0.9 $U_{ном}$. Полученные кривые передаваемой в нагрузку активной мощности при учёте статических характеристик и без него представлены на рисунке 2.3.5 а.

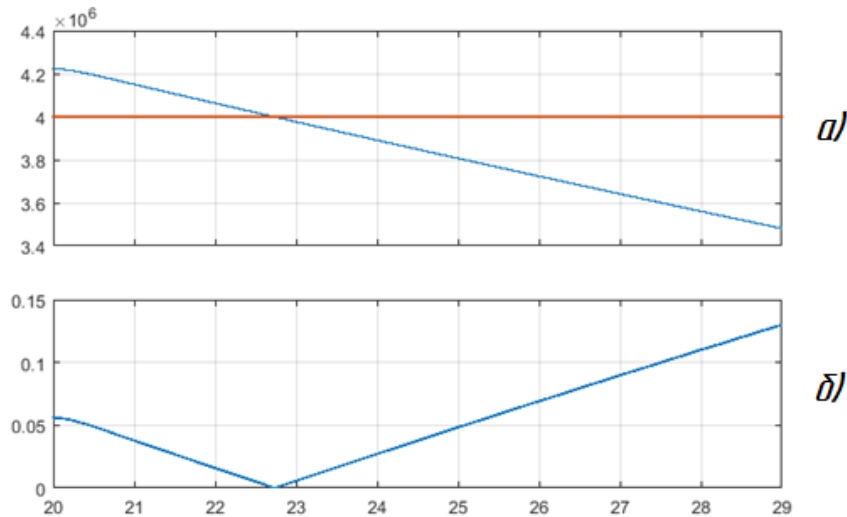


Рисунок 2.3.5 – Диаграммы изменения передаваемой в нагрузку активной мощности и ошибки по активной мощности, вычисленной при учёте статических характеристик и без него

Вычисленное по формуле 2.3.5 значение среднеквадратичной ошибки между кривыми передаваемой активной мощности при учёте статических характеристик и без него представлено на рисунке 2.3.5б. Значение δP_{max} получено при $U_2=0.9U_{ном}$ и равно 13.12%. Абсолютная погрешность между δP_{max} , полученного при моделировании и при аналитическом расчёте по формуле 2.3.8, составила 0.09%.

В разделе была получена формула для оценки среднеквадратичной ошибки при определении передаваемой в нагрузку активной мощности при учёте статических характеристик и без него, которая для рассматриваемых параметрах линии и нагрузки составила 13.12%. Значение ошибки было также получено при помощи разработанной модели, абсолютная погрешность между двумя способами составила 0.09%.

2.4 Увеличение передаваемой активной мощности распределительной сети посредством применения компенсирующих устройств

Как указывалось выше, пропускная способность линии ограничивается двумя параметрами: допустимое напряжение в узлах нагрузки и на зажимах

электрооборудования; допустимый ток в линии электропередачи. Рассмотрим первое ограничение.

Увеличение пропускной способности линии напрямую связано с поддержанием допустимого уровня напряжения на нагрузке. Согласно действующему ГОСТу 32144-2013 (дата введения – 2014-07-01) «положительные и отрицательные отклонения напряжения» в точке передачи электрической энергии не должны превышать 10% номинального или согласованного значения напряжения в течение 100% времени интервала в одну неделю». Очевидно, что при увеличении пропускной способности зачастую связано с увеличением тока линии, что в свою очередь приводит к увеличению напряжения в узлах нагрузки. Для поддержания напряжения на допустимом уровне применяются устройства компенсации потерь напряжения [84]. Среди них выделим наиболее распространенные:

- вольто-добавочный трансформатор (ВДТ);
- устройство продольно-емкостной компенсации (УПК);
- устройство поперечно-емкостной компенсации (УПОК).

Как указывалось выше, согласно ГОСТ 32144-2013 напряжение в узлах нагрузки и на электрооборудовании не может отличаться больше чем, $\pm 10\%$ от номинального. В случае с продольной компенсацией напряжение по всей линии не может выходить за установленные пределы, т.к. увеличение напряжения вдоль линии выше его значения в узле, к которому подсоединяется фидер с УПК, возможно лишь при $X_{\text{упк}} > X_{\text{л}}$, что недопустимо по условиям устойчивости [85].

В случае с поперечной компенсацией такое тоже невозможно, т.к. может иметь место только в случае перекомпенсации реактивной мощности. Иное дело, случай с ВДТ. ВДТ может увеличить напряжение вдоль линии свыше допустимого с одним только допущением – в последующих за его

подключением узлах сети (включая напряжение на электрооборудовании) не может выходить за допустимые пределы.

В [86] показано, что наиболее эффективно ВДТ подключать в начале линии, что уменьшит коэффициент его трансформации и тем самым его стоимость.

Таким образом, в работе установлено, что применение рассмотренных в работе компенсирующих устройств может увеличить значение передаваемой мощности в три раза по сравнению с ее наименьшим значением, что было отмечено в разделе 2.1.

2.4.1 Ограничение по допустимому току

Вторым ограничивающим фактором является допустимая величина тока в распределительной сети. Для трехфазной нагрузки значение допустимого тока в сети определяется из выражения:

$$I_{\text{доп.}} = \frac{\sqrt{P_n^2 + Q_n^2}}{\sqrt{3}U_2} = \frac{P_n \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_n}}{\sqrt{3}U_2}. \quad (2.4.1)$$

Если принимать в качестве U_2 его минимально допустимое значение, т.е. $U_2 = 0.9U_n$, то передаваемую мощность можно вычислить по выражению.

$$P_n = \frac{1.56U_n I_{\max}}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_n}}. \quad (2.4.2)$$

Максимальное значение P_n , соответствующее пропускной способности линии будет равно (при $\operatorname{tg} \varphi_n = 0$):

$$P_n = 1.56U_n I_{\max}. \quad (2.4.3)$$

Таким образом, по результатам, полученным выше, можно сформулировать подход к определению пропускной способности линии и передаваемой мощности для конкретной нагрузки и параметров линии, который заключается в следующем.

Пропускную способность линии следует определять по наименьшей величине P_n , значение которой определяется двумя выражениями:

$$P_n = \frac{0.18U_n^2}{R_n}, \quad (2.4.4)$$

$$P_n = 1.56U_n I_{\max}.$$

Величину возможной передаваемой активной мощности следует выбирать по минимуму из следующих выражений:

$$P_n = \frac{0.18U_n^2}{R_n(1 + \operatorname{tg} \varphi_n \operatorname{tg} \varphi_k)}, \quad (2.4.5)$$

$$P_n = \frac{1.56U_n I_{\max}}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_n}}.$$

Приведенный выше алгоритм определения возможной передаваемой активной мощности справедлив, когда можно пренебрегать статической характеристикой нагрузки. При учете статической характеристики следует пользоваться моделью, приведенной в разделе 2.3.2 с последующим сравнением полученных результатов с выражением 2.4.5.

Таким образом, разработанный алгоритм определения пропускной способности и передаваемой активной мощности будет соответствовать блок-схеме, показанной на рисунке 2.4.1

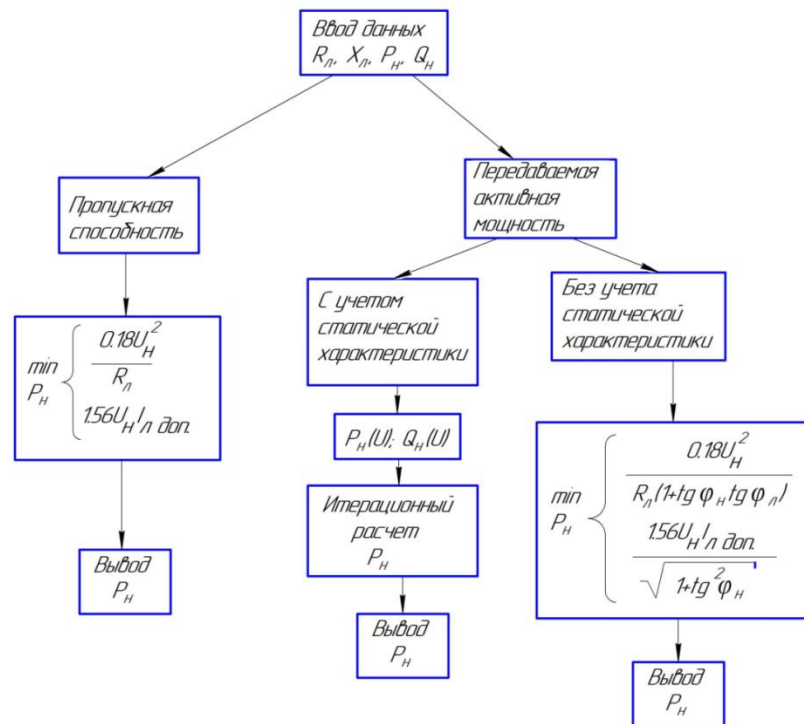


Рисунок 2.4.1 – Блок схема алгоритма определения пропускной способности и передаваемой активной мощности

Блок схема алгоритма представлена на рисунке 2.4.1. Идея алгоритма заключается в выборе определения величины передаваемой активной мощности и пропускной способности линии в зависимости от входных данных. Для определения величины передаваемой активной мощности необходимо определить активное и реактивное сопротивление как самой линии, так и нагрузки, подключенной к ней. Вычисление значения передаваемой активной мощности осуществляется по одному из методов, в зависимости от учёта либо пренебрежения статической характеристикой нагрузки. При учете статической характеристики нагрузки расчет выполняется итерационным методом. Как было сказано выше, при тангенсе угла линии или нагрузки равным нулю, то есть их реактивные составляющие скомпенсированы, передаваемая активная мощность равна пропускной способности линии, что отражено в блок схеме.

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 2

1. Учитывая ограничения по допустимым уровням напряжения, обусловленные ГОСТ 29322-2014 «Напряжения стандартные», а именно $\pm 10\% U_n$ в распределительной сети среднего напряжения были получены аналитические выражения зависимости пропускной способности радиальной линии и передаваемой мощности от параметров линии и нагрузки.

2. Для реального диапазона варьирования параметров $\operatorname{tg} \varphi_d$ и $\operatorname{tg} \varphi_n$ определено, что пропускная способность в случае применения устройств компенсации может превышать минимальное значение передаваемой мощности в три раза. Утверждение справедливо без учета статической характеристики нагрузки.

3. На основе разработанной компьютерной модели был проведен анализ учета статической характеристики нагрузки. Выявлено, что ее неучет может привести к значительной ошибке при определении величины передаваемой активной мощности. Для конкретного примера распределительной сети с $R_d = 0.1$; $X_d = 0$ и параметрами нагрузки в виде статических характеристик

$$k_P(U) = \frac{P_n(U)}{P_{ном}} = 1.3993 - 1.4361 \frac{U_2}{U_{ном}} + 1.0368 \cdot \left(\frac{U_2}{U_n} \right)^2;$$

$$k_Q(U) = \frac{Q_n(U)}{Q_{ном}} = 2.8918 - 5.1876 \frac{U_2}{U_{ном}} + 3.2958 \cdot \left(\frac{U_2}{U_n} \right)^2,$$

неучет указанных характеристик может привести к ошибке, оцененной в 13%.

4. Разработан критерий, позволяющий численно определить передаваемую активную мощность с учетом ограничений способов компенсации падения напряжения и реактивных токов.

5. В случае использования существующей линии без изменения параметров провода, получено аналитическое выражение зависимости пропускной способности и передаваемой активной мощности от параметров распределительной линии, исходя из второго ограничения по допустимому току в линии электропередачи.

6. Разработан алгоритм определения пропускной способности и передаваемой активной мощности в распределительной сети среднего напряжения при использовании компенсирующих устройств и с учетом или без учета статических характеристик. В основу алгоритма положены аналитические зависимости, полученные в главе 2. Алгоритм подразумевает использование разработанной компьютерной модели.

ГЛАВА 3 ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СПОСОБОВ ПЕРЕВОДА РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ НА ПОСТОЯННЫЙ ТОК

В главе рассмотрены основы повышения пропускной способности трехпроводной трехфазной линии электропередачи переменного тока в распределительных сетях при переводе ее на постоянный ток, введен коэффициент, позволяющий количественно оценить увеличение потока мощности при смене рода тока и, в рамках предложенной теоретической основы, проведен анализ эффективности смены рода тока в распределительной сети различными способами.

Как и в предыдущих главах, рассмотрению подлежит электротехнический комплекс предприятия получающее питание по линиям электропередач среднего напряжения.

Пропускная способность линий электропередач распределительной сети постоянного тока повышается за счет [87]:

- снижения полного сопротивления проводов линии электропередачи;
- использования земли в качестве возвратного провода;
- перегрузки проводов линии электропередачи при работе в повторно-кратковременном режиме.

Следует отметить, что далее рассматривается понятие пропускная способность, так как считается, что передаваемая активная мощность в линии достигла максимума за счет приведенных выше способов повышения передаваемой активной мощности, либо имела величину активной мощности равной пропускной способности изначально.

Включение СЭС постоянного тока в систему электроснабжения переменного тока повышает коэффициент мощности нагрузки до единицы, так как все виды неактивной мощности [88] обеспечиваются преобразователями и неактивные составляющие тока (такие как токи высших гармоник, обратной и нулевой последовательностей) не загружают линии

электропередачи. Понятно, что при больших коэффициентах несимметрии и несинусоидальности переход на постоянный ток будет давать положительный эффект даже в случаях, когда пропускная способность распределительной сети при переходе уменьшается, поэтому для повышения объективности исследования при сравнении линий передачи различного рода приняты следующие допущения:

- система электроснабжения работает так, что по линиям протекают только токи основной частоты, прямой последовательности, а преобразователи, входящие в состав распределительной сети постоянного тока обеспечивают потребность нагрузки в неактивных токах без влияния на напряжения и токи в линии;

- провода линии переменного тока выбраны так, что *коэффициент запаса линии электропередачи по току* $K_{зт}$, определяемый как отношение наибольшего допустимого по нагреву проводников тока к току, протекающему по линии электропередачи, больше или равен 1;

- потери напряжения в линиях электропередачи при передаваемой активной мощности не превышают допустимых, иными словами *коэффициент запаса линии электропередачи по напряжению* $K_{зн}$, определяемый как отношение пропускной способности линии электропередачи по напряжению к передаваемой активной мощности, больше или равен 1;

- все рассматриваемые линии электропередачи переменного тока являются трехпроводными.

3.1 Учет снижения полного сопротивления линии при переводе на постоянный ток

Плотность тока в плоскости проводника на переменном токе распределяется неравномерно. Это связано с эффектом поверхностного слоя (skin effect) и эффектом близости (proximity effect) [89]. Поэтому

сопротивление проводов постоянному току в любом случае меньше сопротивления переменному току.

Известно, что при частоте тока 50 Гц и 60 Гц эффекты распределения плотности тока практически нивелируются [90] и принимать их в расчет следует только при наличии в токе линии высших гармонических составляющих [89]. В связи с принятыми в работе допущениями, вышеизложенные эффекты не учитывались при анализе изменения пропускной способности линии.

Одной из главных причин увеличения пропускной способности линии переменного тока по напряжению при смене рода тока, является снижение ее полного сопротивления, за счет его реактивной составляющей. Периодическое изменение направления тока, протекающего по проводам, ведет к возникновению переменной электродвижущей силы (ЭДС), изменяющейся в соответствии с законом изменения тока, но опережающей его по фазе на четверть периода. Возникающая ЭДС в теории цепей рассматривается как падение напряжения на реактивном сопротивлении. Ее факторами являются амплитуда тока, его частота (отражающая скорость его изменения) и индуктивность линии электропередачи. Физический смысл явления заключается в попеременном накоплении и отдаче энергии магнитным полем линии электропередачи.

На постоянном токе раз запасенная магнитным полем энергия в установившемся режиме не отдается, поэтому опережающей ЭДС не возникает. Это ведет к уменьшению падения напряжения вдоль линии и увеличению ее пропускной способности соответственно.

Это обстоятельство следует прояснить, так как согласно формуле (2.1.11) реактивное сопротивление линии не влияет на пропускную способность линии электропередачи. Это обусловлено принятым при выводе формулы допущением, о том, что составляющей напряжения в начале линии, ортогональной напряжению на нагрузке можно пренебречь. На

рисунке 3.1.1 (а) составляющая напряжения, синфазная напряжению в конце линии обозначена U_{1p} . Очевидно, что в этом случае реактивное сопротивление линии может быть сколь угодно большим. При этом выполняется следующее отношение:

$$\lim_{\varphi_l \rightarrow \infty} U_1 = \infty, \quad (3.1.1)$$

что не соответствует действительности.

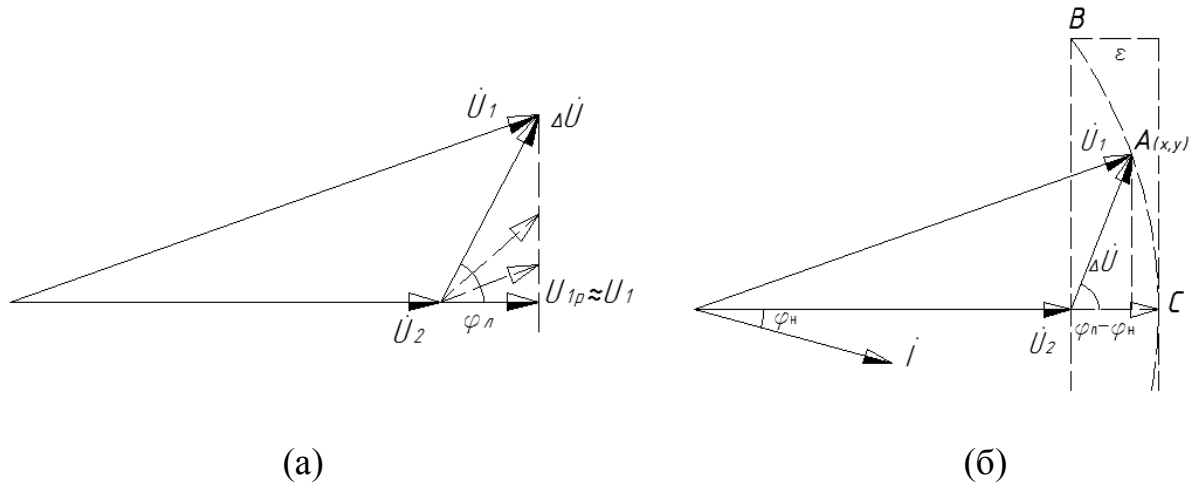


Рисунок 3.1.1 – Векторная диаграмма: а – отражающая принятое допущение, б – учитывающая ортогональную составляющую напряжения в начале линии.

На векторной диаграмме справа (рисунок 3.1.1 (б)) видно, что пропускная способность линии электропередачи ограничена реактивной составляющей сопротивления линии электропередачи. Математически это можно описать системой уравнений:

$$\begin{cases} x^2 + y^2 = k_1^2 \cdot U_n^2; \\ x = k_2 \cdot U_n + I \cdot |z_l| \cdot \cos \varphi_l - \varphi_n; \\ y = I \cdot |z_l| \cdot \sin \varphi_l - \varphi_n \end{cases} \quad (3.1.2)$$

где k_1 - коэффициент определяющий величину напряжения в начале линии, k_2 - величина напряжения в конце линии, z_l - полное сопротивление линии электропередачи.

При решении системы относительно тока линии и ограничении области допустимых значений только положительными значениями, получаем

уточненное выражение для передаваемой по линии электропередачи переменного тока активной мощности:

$$P = IU_2 \cos \varphi_n = k_2 \frac{U_n^2}{|Z_n|} \cos \varphi_n \cdot \sqrt{k_2^2 \cos^2 \varphi_n + k_1^2 - k_2^2} - k_2 \cos \varphi_n, \quad (3.1.3)$$

и, приняв коэффициент мощности нагрузки за единицу, получаем выражение, определяющее пропускную способность линии электропередачи переменного тока по напряжению:

$$P_{\max U} = k_2 \frac{U_n^2}{|Z_n|} \cdot \sqrt{k_2^2 \cos^2 \varphi_n + k_1^2 - k_2^2} - k_2 \cos \varphi_n. \quad (3.1.4)$$

Периодическое изменение полярности тока является причиной возникновения реактивного сопротивления проводов линии электропередач распределительной сети, что снижает ее пропускную способность, так как этот параметр зависит как от величины полного сопротивления линии электропередачи, так и от его характера, что видно из формулы 3.1.4. В контексте сделанных допущений такое представление пропускной способности линии электропередачи переменного тока является более точным.

3.2 Анализ потока мощности

Достоинством передачи электроэнергии линией постоянного тока является отсутствие необходимости транспорта реактивной мощности потребителю и самой линии электропередачи, сущность этого явления была подробно описана в предыдущем разделе. Это обусловлено тем, что реактивная мощность в необходимом количестве может быть сгенерирована непосредственно инвертором [90–92] в точке присоединения нагрузки. Для доказательства этого утверждения составим уравнение по теореме Теллегена [93]:

$$i_a u_a + i_b u_b + i_c u_c = i_d u_d, \quad (3.2.1)$$

где i_a, i_b, i_c – мгновенные переменные токи, i_d – постоянный ток, u_a, u_b, u_c – фазные переменные напряжения, u_d – постоянное напряжение.

Для дальнейшего анализа разделим линейные переменные токи на активные (синфазные напряжению и обозначаемые индексом р) и реактивные (ортогональные напряжению, отстающие от него на четверть периода и обозначаемые индексом q) составляющие:

$$\begin{cases} I_p = I_n \cos \varphi; \\ I_q = I_n \sin \varphi. \end{cases} \quad (3.2.2)$$

Преобразуем уравнение 3.2.1 к виду:

$$I_{ap}U_a \cos \omega t - I_{aq}U_a \sin \omega t + I_{bp}U_b \cos(\omega t - 4\pi/3) - I_{bq}U_b \sin(\omega t - 4\pi/3) + I_{cp}U_c \cos(\omega t + 4\pi/3) - I_{cq}U_c \sin(\omega t + 4\pi/3) = I_d U_d. \quad (3.2.3)$$

Учитывая сделанное допущение о том, что нагрузка симметрична и высшие гармонические составляющие скомпенсированы как на стороне переменного, так и на стороне постоянного тока, получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} I_{ap}U_a + I_{bp}U_b + I_{cp}U_c = I_d U_d; \\ I_{ap}U_a \cos \omega t + I_{bp}U_b \cos(\omega t - 4\pi/3) + I_{cp}U_c \cos(\omega t + 4\pi/3) = 0; \\ I_{aq}U_a \sin \omega t + I_{bq}U_b \sin(\omega t - 4\pi/3) + I_{cq}U_c \sin(\omega t + 4\pi/3) = 0. \end{cases} \quad (3.2.4)$$

Из уравнений системы 3.2.4 видно, что по линии электропередачи в сетях постоянного тока передается только активная мощность, чем и определяется ток линии:

$$I_d = \frac{3I_n U_\phi}{U_d} \cos(\varphi). \quad (3.2.5)$$

Оценить пропускную способность линии электропередачи постоянного тока можно, рассмотрев схему, представленную на рисунке 3.2.1.

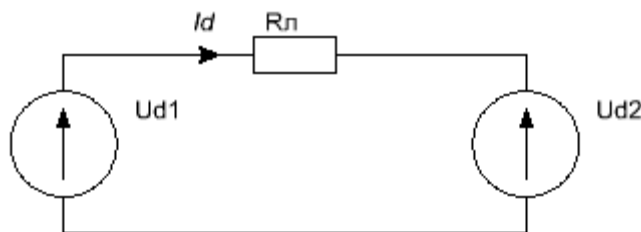


Рисунок 3.2.1 – Схема замещения линии электропередачи распределительной сети постоянного тока в установившемся режиме

Обойдя контур по второму закону Кирхгофа и помножив обе части получившегося уравнения на величину напряжения на нагрузке получаем формулу, по которой можно оценить пропускную способность линии постоянного тока по напряжению:

$$P_{d \max U} = \frac{U_{d1}U_{d2} - U_{d2}^2}{R_{\text{л}}}, \quad (3.2.6)$$

где U_{d1} – напряжение в начале линии постоянного тока, U_{d2} – напряжение в конце линии постоянного тока.

При переводе распределительной сети с переменного тока на постоянный, ее загруженность снижается, так как по линии постоянного тока реактивная мощность не передается. Необходимая нагрузке реактивная мощность может быть обеспечена преобразователем на стороне потребителя. Иными словами после перевода линии на другой род тока передаваемая по ней активная мощность может быть увеличена за счет транспортируемой ранее реактивной мощности. Из формулы 3.2.6 видно, что пропускная способность линии электропередачи постоянного тока по напряжению определяется только ее активным сопротивлением, в то время как пропускная способность линии переменного тока зависит от ее полного сопротивления.

3.3 Выбор напряжения распределительной сети постоянного тока

При переводе распределительной сети на постоянный ток постоянное напряжение можно выбрать минимум в $\sqrt{2}$ раз больше действующего значения переменного напряжения. Возможность пробоя изоляции кабельной линии или электрического разряда по поверхности изоляторов воздушных линий электропередачи зависит от напряженности электрического поля вокруг проводников [94,95], поэтому толщина изолирующего слоя диэлектрика в кабеле и количество изоляторов, удерживающих провода воздушных линий, рассчитаны на амплитудное напряжение переменного тока.

В соответствие с ГОСТ 29322 – 2014 «Напряжения стандартные», диапазон напряжения питания в нормальных системах электроснабжения среднего напряжения (от 6 до 35 кВ) составляет $\pm 10\%$ от номинального напряжения. Стандарт однозначно определяет номинальные напряжения только тяговых систем постоянного тока и систем постоянного тока напряжением менее 750В. Отдельно отмечено, что по техническим и экономическим причинам для специфических областей применения могут потребоваться другие напряжения, поэтому в работе обозначены напряжения постоянного тока соответствующие напряжениям переменного тока, не превышающие амплитудные значения наибольших напряжений электрооборудования, для которых оно обуславливает диэлектрическую прочность изоляции и другие характеристики, которые могут быть связаны с ним в соответствующих рекомендациях для электрооборудования.

В таблице 3.3.1 первый столбец отражает наибольшие действующие значения переменного напряжения для электрооборудования, согласно ГОСТ 29322 – 2014 [94], во втором столбце приведены номинальные линейные напряжения систем трехфазного переменного тока, в третьем столбце соответствующие им напряжения для линий постоянного тока. Пределы отклонения напряжения постоянного тока представлены в четвертом и пятом столбцах.

Таблица 3.3.1 – Системы электроснабжения трехфазные и постоянного тока с номинальным напряжением свыше 1 до 35 кВ включительно

Переменный ток,		Постоянный ток	
Наибольшее напряжение для электрооборудования, кВ	Номинальное напряжение системы электроснабжения, кВ	Номинальное напряжение системы электроснабжения, кВ	
3,6	3,3 3	4,66	4,24
7,2	6,6 6	9,33	8,48

Продолжение таблицы 3.3.1

12	11	10	15,55	14,14
24	22	20	31,11	28,28
36	33	30	46,66	42,42
40,5	-	35	-	49,5

Диапазон допустимого напряжения распределительной сети постоянного тока в таблице 3.3.1 соответствует диапазону действующих напряжений переменного тока ($\pm 10\%$ от номинального), так как зависимость между ними линейная. Это объясняется тем, что максимальное напряжение на выходе мостового трехфазного выпрямителя определяется по формуле 3.3.1:

$$U_{d0} = \frac{3}{\pi} \cdot \int_{-\pi/3}^0 U_n d\Theta = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_n \left[\sin \Theta \right]_{-\pi/3}^0 = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_n \sin 30^\circ = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_n, \quad (3.3.1)$$

где U_{d0} – постоянное напряжение при нулевом угле открытия ключей, Θ – переменная означающая аргумент функции синуса, рад.

При обратном преобразовании максимальное значение переменного напряжения также пропорционально напряжению переменного тока [96]:

$$U_{2lm} \leq U_{d2}, \quad (3.3.2)$$

где U_{2lm} – амплитуда инвертированного линейного напряжения.

Максимальное напряжение униполярной линии постоянного тока можно поставить в соответствие фазному напряжению системы электроснабжения переменного тока:

$$U_d = \frac{3 \cdot \sqrt{6}}{\pi} U_\phi. \quad (3.3.3)$$

Еще раз отметим, что при переводе питания на постоянный ток следует учитывать изменение напряжения. Величина постоянного напряжения может быть больше действующего значения переменного напряжения, но не должна превышать установленных пределов (110% от амплитуды номинального переменного напряжения), чтобы не повредить линию электропередачи.

Постоянное напряжение на выходе мостового выпрямителя пропорционально фазному напряжению, как переменное напряжение на выходе инвертора пропорционально постоянному напряжению. Это позволяет сравнить линии двух родов тока в контексте падения напряжения вдоль линии.

3.4 Реконструкция трехпроводной линии переменного тока в двухпроводную линию постоянного тока

Прямо пропорциональная зависимость напряжений на стороне переменного тока и постоянного позволяет сравнивать пропускную способность линий электропередачи переменного и постоянного тока по напряжению. Дальнейший анализ сосредоточен на сравнении пропускной способности трехфазной трехпроводной линии электропередачи переменного тока, состоящей из трех проводов с активным сопротивлением R_λ и созданных на ее основе, линии постоянного тока. Первым из возможных способов передачи является способ, использующий два провода трехфазной линии (рисунок 3.4.1). Стоит отметить, что это простейший способ замены трехфазной на линию постоянного тока.

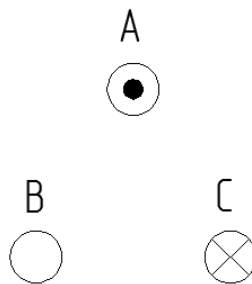


Рисунок 3.4.1 – Схема способа передачи постоянного тока по двум проводам трехпроводной линии

Оценим, во сколько раз увеличится ток, при таком переходе:

$$3 \cdot I_\lambda \cdot U_\phi \cdot \cos \varphi_n = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} I_d \cdot U_\phi; \quad (3.4.1)$$

$$I_d / I_\lambda = 1,28 \cdot \cos \varphi_n. \quad (3.4.2)$$

При одной и той же передаваемой мощности, постоянный ток в 1,28 раз больше переменного, что ограничивает максимум передаваемой по линии активной мощности. При коэффициенте мощности равном 0,78 ток линии электропередачи не увеличится, при больших коэффициентах мощности передаваемую мощность следует уменьшить, что обусловлено принятым допущением, о том, что линия переменного тока максимально загружена по току.

Докажем, что при таком переходе изменяется коэффициент запаса линии по току. Согласно определению:

$$K_{3T} = \frac{I_{\max}}{I_l}, \quad (3.4.3)$$

где $I_{\max}$ – это наибольший допустимый по нагреву ток линии электропередачи.

Заменив в уравнении 3.1.4 переменный ток на постоянный в соответствии с уравнением 3.4.3 получим:

$$K_{d3T} = \frac{I_{\max}}{I_d} = \frac{\sqrt{6} \cdot K_{3T}}{\pi \cdot \cos \varphi_l} \approx \frac{K_{3T}}{1,28 \cos \varphi_l}. \quad (3.4.4)$$

Пропускная способность линии переменного тока по напряжению определяется по формуле:

$$P_{3\phi \max U} = 3 \cdot 0,9 \frac{U_\phi^2 \cdot \left(\sqrt{0,81 \cdot \cos^2 \varphi_l + 1,21 - 0,81} - 0,9 \cos \varphi_l \right)}{R_l \cdot \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_l}}, \quad (3.4.5)$$

а пропускная способность линии постоянного тока по напряжению:

$$P_{d \max U} = \frac{\frac{9 \cdot 6}{\pi^2} U_\phi^2 (1 \cdot 0,9 - 0,9^2)}{2 \cdot R_l}. \quad (3.4.6)$$

Отношение двух этих величин:

$$\frac{P_{d \max U}}{P_{3\phi \max U}} = 0,91 \cdot \frac{0,2 \cdot \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_l}}{\sqrt{0,81 \cdot \cos^2 \varphi_l + 0,4 - 0,9 \cos \varphi_l}}. \quad (3.4.7)$$

Характер этой зависимости представлен на рисунке 3.4.2.

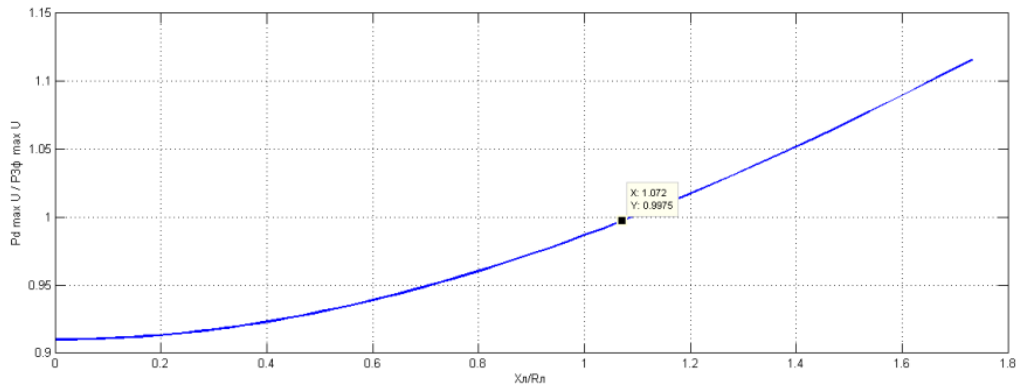


Рисунок 3.4.2 – Зависимость пропускной способности линии постоянного тока, приведенная к пропускной способности линии переменного тока от характера сопротивления линии в распределительной сети переменного тока

Докажем, что коэффициент запаса линии электропередачи по напряжению изменяется пропорционально этой зависимости. Обозначим отношение 3.4.7 как $f(\varphi_n)$, по определению:

$$K_{3H} = \frac{P_{3\phi \max U}}{P}, \quad (3.4.8)$$

где P – активная мощность, передаваемая по линии электропередачи.

При описываемом переходе:

$$P_{3\phi \max U} = \frac{P_{d \max U}}{f(\varphi_n)}, \quad (3.4.9)$$

следовательно:

$$K_{d3H} = \frac{P_{d \max U}}{P} = f(\varphi_n) K_{3H}. \quad (3.4.10)$$

Видно, что характер изменения введенных коэффициентов (K_{3H} и K_{3T}), в описываемом случае изменения рода тока линии электропередачи, зависит от ее параметров (φ_n) и параметров присоединенной к ней нагрузки (φ_n). Так коэффициент запаса линии электропередачи по напряжению, меньше единицы в случае, когда реактивное сопротивление линии меньше активного, что характерно для кабельных линий электропередачи. В характерном для воздушных линий случае, когда реактивное сопротивление больше активного более чем в 1,08 раз, K_{3H} растет. Коэффициент запаса по току зависит только

от характера нагрузки и может быть увеличен, если коэффициент мощности нагрузки меньше 0,78.

Оба введенных коэффициента определяют, во сколько раз может быть увеличена передаваемая по линии электропередачи активная мощность при переводе ее на постоянный ток указанным способом, но так как оба они выполняют ограничивающую функцию, выбирать надо по меньшему из них.

Для оценки увеличения активной мощности, передаваемой по линии электропередачи, введем *коэффициент запаса линии электропередачи по мощности* K_{3M} , равный отношению пропускной способности линии электропередачи, определенной с учетом ограничений по току и по напряжению к активной мощности, передаваемой по линии до смены рода тока:

$$K_{3M} = \frac{P_{\max}}{P} = \min [K_{3T}; K_{3H}]. \quad (3.4.11)$$

Зависимость коэффициента запаса по мощности от параметров нагрузки и линии электропередачи переменного тока при переходе на постоянный ток описываемым способом представлена на рисунке 3.4.3. Эта и последующие зависимости построены с допущением, что коэффициенты запаса по току и по напряжению линии электропередачи переменного тока равны единице $K_{3T} = 1, K_{3H} = 1$.

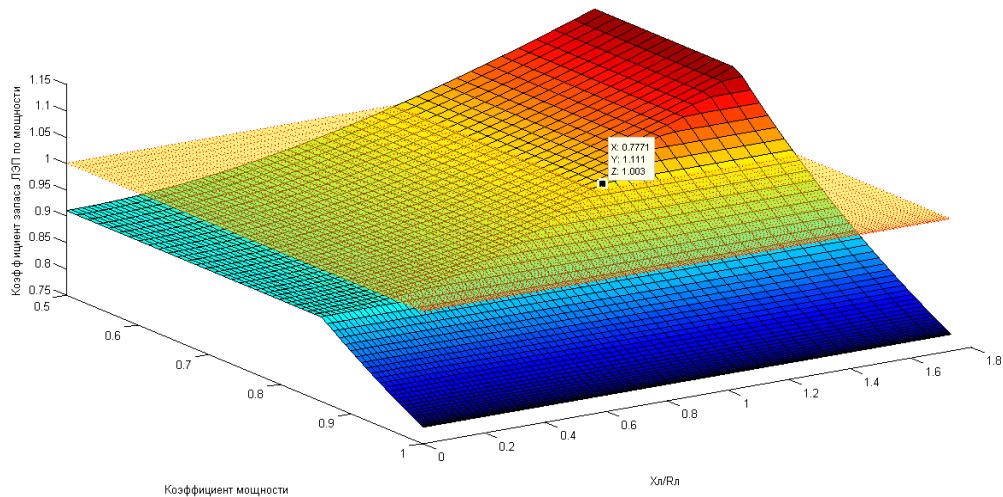


Рисунок 3.4.3 – Зависимость коэффициента запаса двухпроводной линии электропередачи по мощности от параметров нагрузки и линии электропередачи

Ось абсцисс в пространстве на рисунке 3.4.3 соответствует коэффициенту мощности, ось ординат соответствует отношению реактивного сопротивления линии электропередач распределительной сети к активному, а ось аппликат – коэффициенту запаса линии электропередачи по мощности. Фигура, изображенная на рисунке, образована частями двух поверхностей, функций независимых переменных, ограничивают друг друга по оси аппликат по закону минимума. Пространственная кривая пересечения этих поверхностей в неявном виде может быть описана уравнением (для удобства восприятия аргументами функции 3.4.12 являются углы φ_n и φ_l , а график на рисунке 3.4.3 построен от коэффициента мощности $\cos \varphi_n$ и отношения реактивных сопротивлений линии $\operatorname{tg} \varphi_l$):

$$\frac{A \cdot K_{3T}}{\cos \varphi_n} + \frac{B \cdot (1 - k_2) \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_l} \cdot K_{3H}}{\sqrt{k_2^2 \cos^2 \varphi_l + k_1^2 - k_2^2 - k_2 \cos \varphi_l}} - 2 \cdot K_{3M} = 0, \quad (3.4.12)$$

где A – коэффициент учитывающий изменение запаса по току, B – коэффициент учитывающий изменение запаса по напряжению.

Значения, отложенные по вертикальной оси, соответствуют коэффициенту запаса рассматриваемой распределительной сети по мощности

при переводе ее на постоянный ток заданным способом. При этом, получив решение уравнения 3.4.12, можно определить фактор, ограничивающий поток активной мощности линии электропередачи аналитически. Для этого требуется определить проекцию кривой на плоскость осей абсцисс-ординат. Проекция поделит плоскость на две части, в одной из которых ограничивающую роль будет выполнять падение напряжения в линии электропередачи, в другой ток линии. Если расположить плоскость осей абсцисс-ординат перед собой, так что ось абсцисс окажется горизонтальной, а ось ординат вертикальной, то в пространстве слева от кривой перегиба коэффициент запаса по мощности будет ограничен падением напряжения в линии электропередачи, а если справа, то максимально допустимым током линии (рисунок 3.4.4).

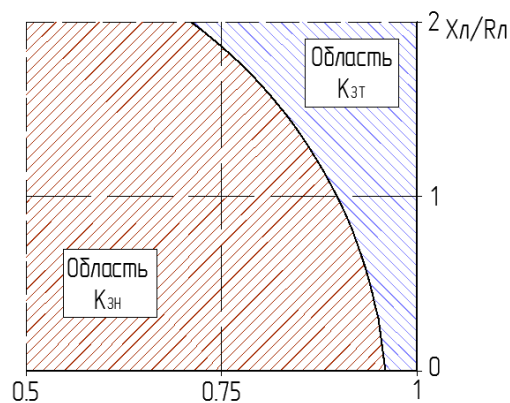


Рисунок 3.4.4 – Проекция кривой пересечения поверхностей на плоскость ХУ

Пропускная способность линии электропередачи соответствует значению аппликаты в точках, лежащих в плоскости $\cos \varphi_n = 1$. Видно, что пропускная способность линии электропередачи ограничена максимально допустимым током и при рассматриваемом переходе снижается на 23 %. Точки пересечения этой фигуры с плоскостью $K_{3M} = 1$ определяют параметры линии, при которых сеть постоянного тока может обеспечивать ту же активную мощность, что и сеть переменного тока.

Количественная оценка увеличения передаваемой по линии активной мощности при переводе ее на постоянный ток сложна, так как следует учитывать как ограничения по падению напряжения, так и ограничение по

максимально допустимому току, на которые влияет способ перехода. Для упрощения процесса оценки введен коэффициент запаса линии по мощности, показывающий во сколько раз можно увеличить поток активной мощности. Из представленного анализа понятно, что пропускная способность двухпроводной линии электропередачи в сравнении с трехпроводной трехфазной линией переменного тока меньше, поэтому переход может быть эффективен только в некотором, ограниченном диапазоне значений рассматриваемых параметров. Таким образом, при описываемом переходе передаваемая по линии активная мощность может быть увеличена, только при коэффициенте мощности нагрузки меньшем 0,77 и при величине отношения реактивного сопротивления линии электропередачи к активному более чем в 1,11 раза.

3.5 Реконструкция трехпроводной линии переменного тока в трехпроводную линию постоянного тока в распределительных сетях промышленного предприятия

Другим тривиальным способом перевода трехпроводной линии электропередачи переменного тока на постоянный является переход с применением в передаче электроэнергии всех трех проводов. В случае такого перехода один провод подключается к положительному полюсу, два других к отрицательному, или наоборот. Таким образом, ток в одном проводе линии электропередачи направлен навстречу токам в двух других проводах. В дальнейшем такой способ передачи будем обозначать *«один прямой, два обратных»*. Следует также отметить, что при его реализации один из проводов проводит полный ток, в то время как два других только половину.

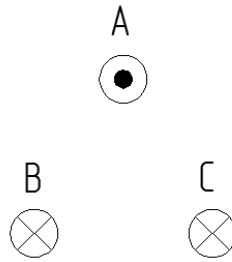


Рисунок 3.5.1 – Схема способа передачи «один прямой, два обратных»

Достоинством этого способа перевода линии переменного тока на постоянный является уменьшение сопротивления линии в 1,25 раз (с $2R_{\text{л}}$ до $1,5R_{\text{л}}$) за счет увеличения сечения одного из проводов в два раза. Это ведет к повышению запаса линии электропередачи по напряжению:

$$K_{d3H} = 1,21 \cdot \frac{0,2 \cdot \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_{\text{л}}}}{\sqrt{0,81 \cdot \cos^2 \varphi_{\text{л}} + 0,4 - 0,9 \cos \varphi_{\text{л}}}} \cdot K_{3H}. \quad (3.5.1)$$

Понятно, что характер изменения коэффициента запаса линии электропередачи по напряжению аналогичен представленному на рисунке 3.4.2.

Зависимость коэффициента запаса по току аналогична зависимости для предыдущего случая (формула 3.4.4).

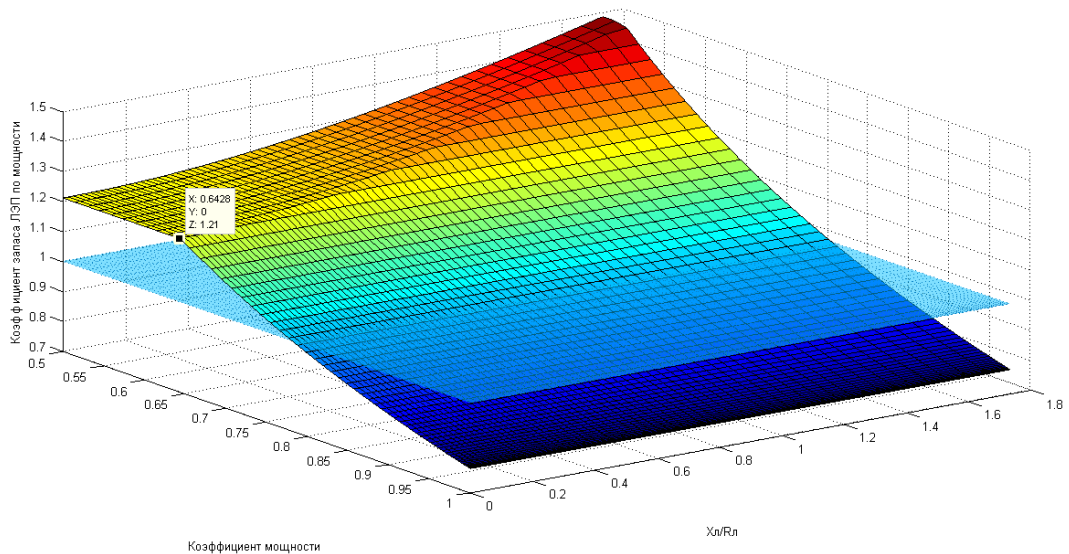


Рисунок 3.5.2 – Зависимость коэффициента запаса мощности трехпроводной линии электропередачи от параметров нагрузки и линии электропередачи

В этом случае, как и в предыдущем, пропускная способность линии электропередачи ограничена током и не изменяется, однако уменьшение сопротивления линии электропередачи ведет к повышению коэффициента запаса линии по напряжению. Увеличение потока активной мощности возможно при любом соотношении реактивного и активного сопротивления линии электропередачи при коэффициенте мощности меньше чем 0,77. Ограничение передаваемой мощности по падению напряжения начинает действовать только если коэффициент мощности нагрузки меньше чем 0,64.

3.6 Способы передачи электроэнергии по трем проводам с повторнократковременной перегрузкой проводов по току

Рассмотренный случай не является оптимальным, так как при передаче электроэнергии используется только два провода из трех. При переводе существующих трехпроводных линий электропередачи на постоянный ток целесообразно применять все три имеющихся провода. Рассмотрим способ, предусматривающий последовательное переключение двух из трех проводов линии электропередачи. Схема способа представлена на рисунке 3.6.1.

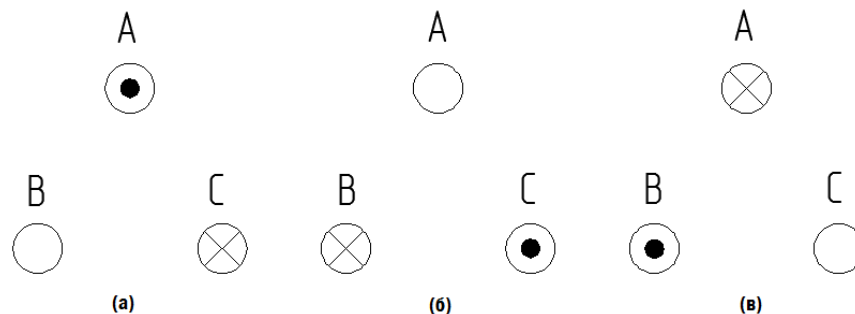


Рисунок 3.6.1 – Распределение постоянного тока по двум проводам трехпроводной линии электропередачи в режиме переключения проводов

Периодом переключения проводов линии электропередачи будем называть промежуток времени T , за который линия электропередачи реализует все три способа распределения тока по проводам (рисунок 3.6.1), при условии, что на работу в каждом из них затрачивается одинаковое количество времени. Видно, что в каждый момент времени для передачи

электроэнергии используется только два провода, однако каждый из них проводит ток только две трети периода. Провода линии электропередачи работают в повторно-кратковременном режиме, что обуславливает возможность их перегрузки.

Определим во сколько раз можно увеличить ток при работе линии в повторно-кратковременном режиме. Пусть период переключения проводов линии электропередачи меньше постоянной времени их нагрева, тогда между максимально допустимым по нагреву током линии электропередачи в обычном режиме и максимально допустимым током повторно-кратковременного режима должно выполняться равенство по количеству выделяемой теплоты. Исходя из закона Джоуля-Ленца:

$$I_d^2 \cdot R_l \cdot T = \frac{2}{3} T \cdot I_{dнк}^2 \cdot R_l, \quad (3.6.1)$$

где $I_{dнк}$ — это ток линии постоянного тока, работающей в повторно-кратковременном режиме.

Из уравнения 3.6.1 определяем искомое отношение:

$$\frac{I_{dнк}}{I_d} = \sqrt{\frac{3}{2}} \quad (3.6.2)$$

Тогда коэффициент запаса линии электропередачи по току при реконструкции линии описываемым способом:

$$K_{d3T} = \frac{I_{\max}}{I_{dнк}} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{\sqrt{6} \cdot K_{3T}}{\pi \cdot \cos \varphi_n} = \frac{3 \cdot K_{3T}}{\pi \cdot \cos \varphi_n} \approx \frac{K_{3T}}{1,05 \cdot \cos \varphi_n} \quad (3.6.3)$$

Определение коэффициента запаса линии электропередачи по напряжению, не отличается от случая, рассмотренного в четвертом разделе (формула 3.4.10, рисунок 3.4.2), так как сопротивление линии электропередачи и границы изменения напряжения остались неизменными.

На рисунке 3.6.2 представлена зависимость коэффициента запаса линии электропередачи по мощности от параметров нагрузки и линии электропередачи.

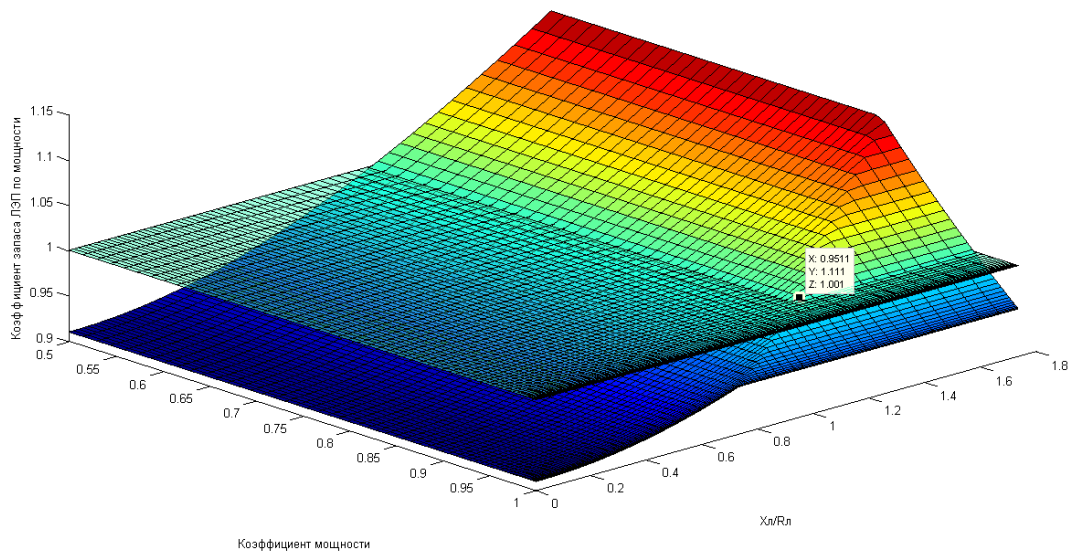


Рисунок 3.6.2 – Зависимость коэффициента запаса по мощности двухпроводной линии электропередачи от параметров нагрузки и линии электропередачи при работе в повторно-кратковременном режиме

Из рисунка видно, что передаваемая по линии электропередачи активная мощность в основном ограничена по условию падения напряжения. Пропускная способность линии при рассматриваемом переходе определяется ограничением не только по току, но и по напряжению и снижается на величину от 5 до 9 % (в зависимости от реактивного сопротивления линии). Увеличение потока активной мощности достигается при коэффициенте мощности нагрузки меньше, чем 0,95 и при величине отношения реактивного сопротивления к активному больше, чем 1,1.

Другой способ, при котором все три провода линии электропередачи работают в повторно-кратковременном режиме, основан на описанном ранее способе передачи «один прямой, два обратных». Схема способа представлена на рисунке 3.6.3.

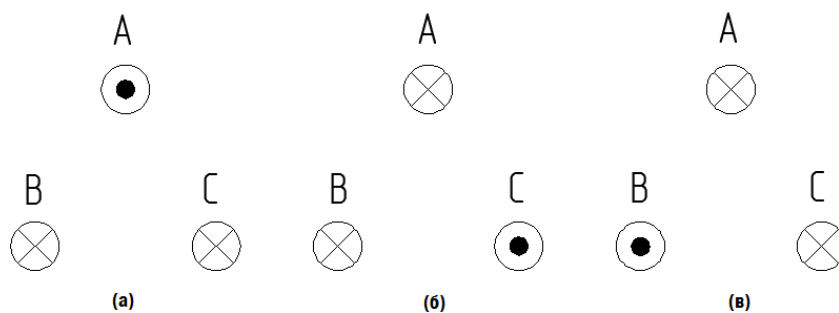


Рисунок 3.6.3 – Распределение постоянного тока по трем проводам трехпроводной линии электропередачи с переключением проводов

Для определения коэффициента запаса линии электропередачи по току проведем анализ, с теми же допущениями, что и в предыдущем случае. Баланс количества теплоты:

$$I_d^2 \cdot R_n \cdot T = \frac{1}{3} T \cdot I_{d_{нк}}^2 \cdot R_n + \frac{2}{3} T \cdot \frac{I_{d_{нк}}^2}{4} \cdot R_n. \quad (3.6.4)$$

Отношение тока в рассматриваемом повторно-кратковременном режиме работы линии электропередачи к току нормальному току двухпроводной линии:

$$\frac{I_{d_{нк}}}{I_d} = \sqrt{2}. \quad (3.6.5)$$

Коэффициент запаса по току линии в описываемом повторно-кратковременном режиме:

$$K_{d_{3T}} = \frac{I_{\max}}{I_{d_{нк}}} = \sqrt{2} \cdot \frac{\sqrt{6} \cdot K_{3T}}{\pi \cdot \cos \varphi_n} = \frac{\sqrt{12} \cdot K_{3T}}{\pi \cdot \cos \varphi_n} \approx \frac{K_{3T}}{0,9 \cdot \cos \varphi_n}. \quad (3.6.6)$$

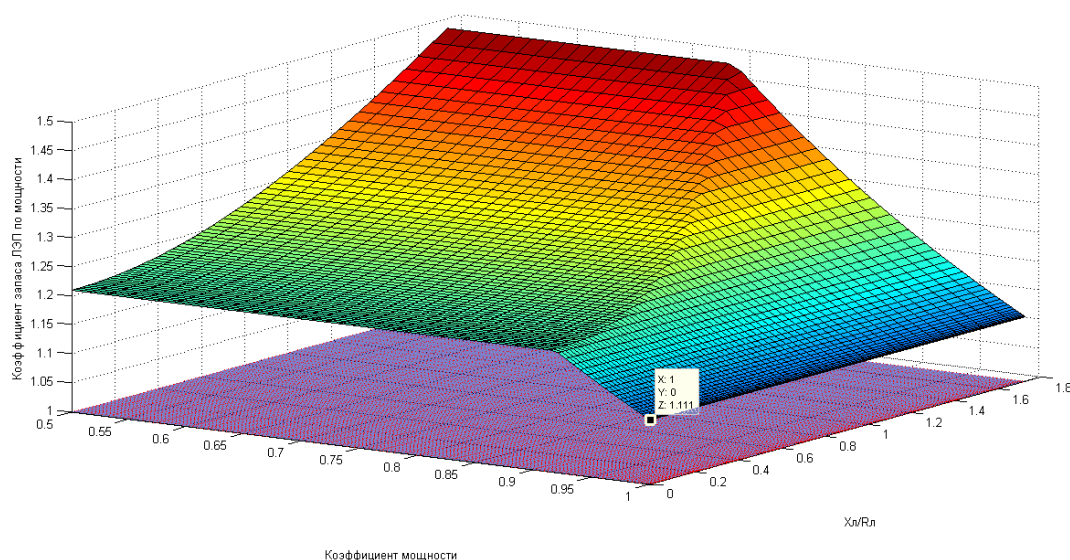


Рисунок 3.6.4 – Зависимость коэффициента запаса трехпроводной линии электропередачи по мощности от параметров нагрузки и линии электропередачи при работе в повторно-кратковременном режиме

В последнем случае пропускная способность линии электропередачи увеличивается на одиннадцать процентов. Более того за счет реактивной мощности и реактивного падения напряжения в линии поток активной мощности может быть увеличен даже больше.

Наличие трех проводов в линии электропередачи переменного тока позволяет реализовывать повторно-кратковременные режимы работы электропередачи, при работе в которых повышается коэффициент запаса линии электропередачи по току. Проведенный анализ дает достаточное основание утверждать, что при переводе трехпроводной линии переменного тока на постоянный, без использования возврата по земле, оптимальной является передача с использованием трех проводов включенных по схеме «один прямой, два обратных», в повторно кратковременном режиме. В разделе установлено, что работа сети в режиме повторно-кратковременной перегрузки проводов по току повышает коэффициент запаса линии электропередачи по току в 1,41.

3.7 Способ передачи электроэнергии постоянным током с возвратом по земле

Униполярные (или однополярные) линии электропередачи предполагают возврат тока по земле или по воде, что имеет как положительные, так и отрицательные стороны. Использование земли в качестве проводника для возвратного тока причина явления называемого «блуждающие токи», которое заключается в том, что возвратный ток проходит по металлическим конструкциям, соприкасающимся с землей (трубопроводам, подземным емкостям, арматуре). Место «входа» (земля имеет положительный потенциал относительно электрода) токов в металлоконструкцию называется катодной зоной, а место «выхода» (земля имеет отрицательный потенциал относительно электрода) – анодной зоной. Постоянное присутствие блуждающих токов может вызвать коррозию в анодной зоне металлических конструкций, и помехи в системах связи, в частности при ведении буровзрывных работ наличие их может привести к детонации заряда [55].

Униполярные линии постоянного тока в распределительной сети имеют существенные плюсы. Самое главное достоинство заключается в меньшем сопротивлении проводников. Вследствие того, что возвратный ток протекает через очень большее сечение, потери по пути тока пренебрежительно малы и вызваны только переходным сопротивлением электрод-земля, поэтому не зависят от длины линии.

В связи с тем, что сопротивление электродов является фактором потерь при передаче электроэнергии, рассмотрим этот аспект сети постоянного тока подробнее.

Формирование земляного электрода является задачей оптимального распределения плотности тока в плоскости перехода проводник-земля. В толще земли вдоль линии электропередачи плотность тока уменьшается, достигая некоторого минимума, затем вновь увеличивается в конце линии,

это обуславливает минимальные потери по пути передачи и максимальные в зонах катода и анода, поэтому требуется обеспечить как можно меньшую плотность тока на поверхности электродов.

Расчет переходного сопротивления электродов ведется исходя из передаваемой по линии мощности. Нельзя допускать перегрева почвы в зонах входа токов в электрод, так как при этом образуется система с положительной обратной связью: сопротивление почвы вокруг проводника увеличивается, что ведет к дополнительному нагреву и дополнительным потерям напряжения и мощности, ухудшая характеристики линии электропередачи. В идеале можно добиться сколь угодно малого переходного сопротивления, изменяя форму, геометрические размеры и заглубление электродов, однако для расчетов целесообразно задаться некоторым значением, которое позволит в дальнейшем оценить капиталовложения в строительство электродов. Согласно ПУЭ для подстанций и распределительных пунктов напряжением более 1 кВ, с глухозаземленной и эффективно заземленной нейтралью сопротивление электрода составляет 0,5 Ом, поэтому это значение будет использоваться в дальнейших расчетах.

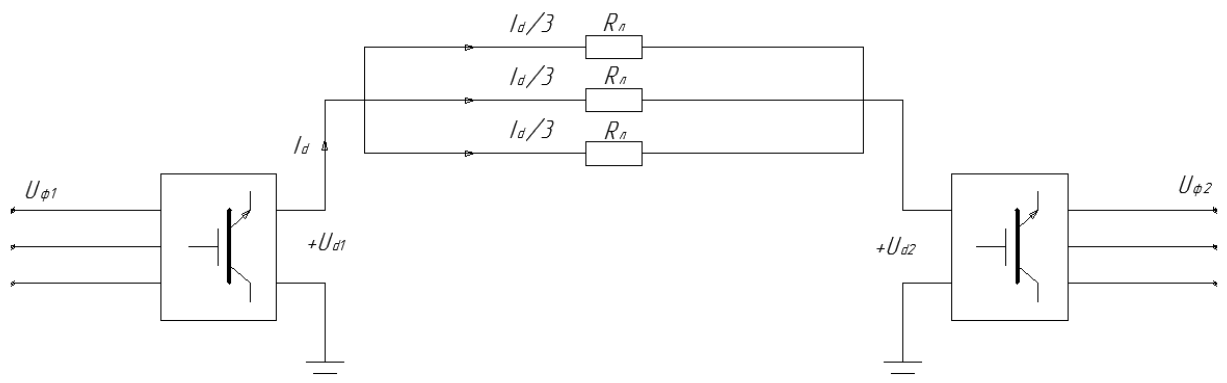


Рисунок 3.7.1 – Принципиальная схема линии постоянного тока с возвратом по земле

На рисунке 3.7.1 представлена принципиальная схема однополюсной линии электропередачи постоянного тока с тремя проводами

(реконструированной из трехпроводной линии переменного тока) с возвратом по земле. Параллельное включение проводов позволяет уменьшить сопротивление линии электропередачи:

$$R_{d\lambda} = \frac{1}{3} R_{3\phi\lambda} + 2 \cdot R_{эл} = \frac{1}{3} R_{3\phi\lambda} \cdot K_{эл} \quad (3.7.1)$$

где $R_{эл}$ – активное сопротивление перехода земля-электрод, а $K_{эл}$ – коэффициент учитывающий сопротивление перехода электрод-земля в сопротивлении линии электропередачи.

Определим коэффициент запаса по току для линии электропередачи такого типа. Для этого составим баланс количества теплоты с учетом того, что в рассматриваемом случае по каждому проводу линии протекает треть полного тока линии:

$$I_d^2 \cdot R_{\lambda} \cdot T = \frac{I_{d\phi 3}^2}{9} \cdot R_{\lambda} \cdot T, \quad (3.7.2)$$

где $I_{d\phi 3}$ – ток линии с возвратом по земле.

Отношение токов в этом случае равно:

$$\frac{I_{d\phi 3}}{I_d} = 3. \quad (3.7.3)$$

А коэффициент запаса линии электропередач по току определяется по формуле:

$$K_{d3T} = \frac{I_{\max}}{I_{d\phi 3}} = 3 \cdot \frac{\sqrt{6} \cdot K_{3T}}{\pi \cdot \cos \varphi_n} \approx \frac{K_{3T}}{0,427 \cdot \cos \varphi_n}. \quad (3.7.4)$$

Коэффициент запаса линии по напряжению вследствие уменьшения сопротивления линии увеличится:

$$K_{d3H} \approx \frac{5,47}{K_{эл}} \cdot \frac{0,2 \cdot \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_n}}{\sqrt{0,81 \cdot \cos^2 \varphi_n + 0,4 - 0,9 \cos \varphi_n}} \cdot K_{3H}. \quad (3.7.5)$$

Коэффициент запаса линии электропередачи по мощности в этом случае составит:

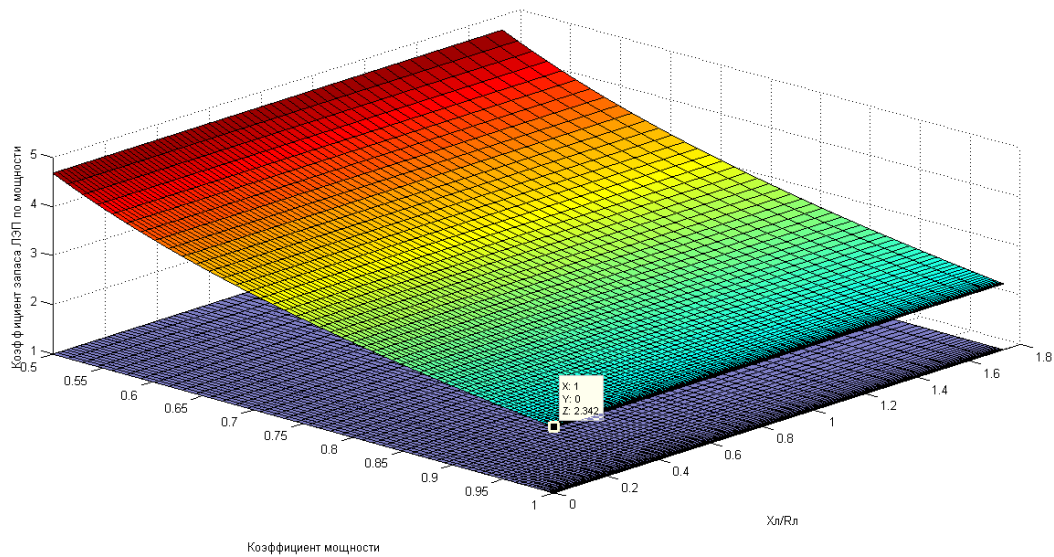


Рисунок 3.7.2 – Зависимость коэффициента запаса по мощности трехпроводной линии с возвратом по земле от ее параметров и параметров нагрузки

Из-за того, что сопротивление линии уменьшилось в три раза, единственно важным ограничением передаваемой в сети активной мощности в рассматриваемом случае является допустимый по условию нагрева проводов ток. В разделе установлено, что коэффициент запаса по мощности линии после смены рода тока возрастает в 2,34 раза.

Перевод трехпроводной трехфазной линии переменного тока на постоянный ток с использованием земли в качестве проводника позволяет в разы увеличить поток активной мощности, но описанный переход сопровождается явлением блуждающих токов, что ограничивает применение этого способа, так как блуждающие токи способствуют коррозии металлических объектов, имеющих контакт с землей. Поэтому переход возможен только в случае, если на пути блуждающих токов не встречается металлоконструкций имеющих значение для народного хозяйства не оборудованных системой катодной защиты.

3.7.1 Повышение напряжения распределительной сети

При изменении рода тока существует возможность создания биполярной линии электропередачи постоянного тока. На рисунке 3.7.3 изображена биполярная линия, включающая в свой состав два провода, имеющих соответственно положительный $+U_d$ и отрицательный $-U_d$ потенциалы относительно земли.

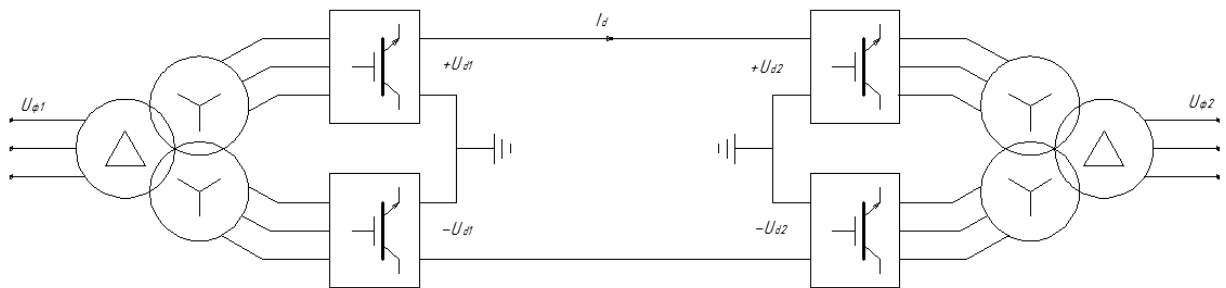


Рисунок 3.7.3 – Биполярная линия электропередачи постоянного тока

Фактически биполярная система представляет собой две однополярные системы, объединенные в одну. Структурно она включает минимум четыре преобразователя, присоединенных к сети через трансформаторы с двумя вторичными обмотками. Включение трансформаторов необходимо для обеспечения гальванической развязки между положительным и отрицательным полюсом линии. Это позволяет повысить напряжение средствами преобразователей и силовых трансформаторов, что ведет к увеличению активной мощности, передаваемой в распределительной сети. Такая система может функционировать как однополярная, в случае необходимости отлучения одного из плеч (полюсов) линии, при этом земля или вода используется в качестве второго провода. На этапе строительства такая линия может быть введена в эксплуатацию до окончания монтажа всех преобразователей, с половинной мощностью [90].

Чтобы учесть повышение напряжения средствами преобразователей введем коэффициент $K_{\phi 1}$, изменяющийся в пределах от одного до двух. Для полноты анализа следует также включить в расчет коэффициент

трансформации силовых трансформаторов K_{mp} , входящих в состав биполярной линии электропередачи.

Определим коэффициент запаса линии по току при реконструкции ее в биполярную линию по схеме один прямой, два обратных, описанной ранее:

$$K_{d\ 3T} = \frac{I_{\max}}{I_d} = \frac{K_{3T} \cdot K_{\text{бл}} \cdot K_{mp}}{0,9 \cos \varphi_n}. \quad (3.7.6)$$

Определим коэффициент запаса линии электропередач по напряжению:

$$K_{d\ 3H} = 1,21 \cdot K_{\text{бл}}^2 \cdot K_{mp}^2 \cdot \frac{0,2 \cdot \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_n}}{\sqrt{0,81 \cdot \cos^2 \varphi_n + 0,4 - 0,9 \cos \varphi_n}} \cdot K_{3H}. \quad (3.7.7)$$

Из уравнений 3.7.6 и 3.7.7 видно, что коэффициент запаса по току растет прямо пропорционально увеличению напряжения, в то время как коэффициент запаса по напряжению растет пропорционально квадрату коэффициентов, повышающих напряжение, поэтому повышение напряжения передачи целесообразно применять в случае, если до перехода линия электропередачи исчерпала запас по напряжению.

Из анализа, представленного в предыдущих разделах главы, понятно, что наиболее эффективным способом передачи электроэнергии при переводе трехпроводной линии переменного тока на постоянный без использования земли в качестве проводника (это обусловлено тем, что биполярная линия электропередачи требует наличия двух проводов, а земля относительно полюсов должна обладать нулевым потенциалом) является передача по схеме «один прямой, два обратных» в повторно-кратковременном режиме. Сочетание повторно-кратковременного режима работы и повышенного напряжения обеспечивает увеличение пропускной способности биполярной линии электропередачи кратно повышению напряжения передачи.

Следует убедиться в том, что повышение напряжения возможно и не ведет к сокращению срока службы распределительной сети или аварии. Кабельные линии электропередачи для такой реконструкции практически не подходят. Это обусловлено тем, что материал изоляции и его толщина

выбраны для соответствующего класса напряжения и не подлежат замене в ходе эксплуатации линии. Воздушные линии электропередач позволяют относительно просто увеличить напряжение путем увеличения числа изоляторов, крепящих провода линии к арматуре башни [56].

Следует отметить, что уравнения 3.7.6 и 3.7.7 применимы и для анализа униполярной линии с силовым трансформатором. Для анализа линий электропередачи этого типа нужно принять коэффициент $K_{\text{бл}}$ в рассматриваемых уравнениях равным 1.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

Исходя из полученных в третьей главе результатов, можно сделать следующие выводы:

1. В главе была введена уточненная формула определения пропускной способности линии электропередачи по напряжению, учитывающая ортогональную составляющую падения напряжения в линии электропередачи, обусловленную как активной, так и реактивной нагрузками. Основанием применения уточненной формулы является необходимость учета реактивного падения напряжения при переводе линии с постоянного тока на переменный;

2. Для количественной оценки повышения передаваемой активной мощности в электротехническом комплексе предприятия, в случае перевода трехпроводной линии электропередачи на постоянный ток был введен коэффициент запаса по мощности, определяющий во сколько раз можно увеличить поток активной мощности при смене рода тока, и разработан метод его расчета, который основан на определении коэффициентов запаса линии электропередач распределительной сети по напряжению и по току, отражающих два фундаментальных ограничения пропускной способности линии электропередачи среднего уровня напряжения, и выборе наименьшего из них;

3. Получены и отражены в виде графиков математические выражения коэффициента запаса по мощности трехпроводной линии электропередачи при изменении рода тока линии электропередач различными способами в зависимости от ее параметров и коэффициента мощности нагрузки с учетом сделанных допущений, а именно получены выражения для: способа, предполагающего использование двух проводов, способа с использованием трех проводов по схеме «один прямой, два обратных», двух проводов с перегрузкой в повторно-кратковременном режиме, трех проводов с перегрузкой в повторно-кратковременном режиме, способа с использованием трех проводов с возвратом по земле;

4. Установлено, что при использовании двух и трех проводов в трехпроводной линии постоянного тока пропускная способность снижается на 23%, при переключении двух проводов снижается от 5 до 9%, в зависимости от реактивного сопротивления линии, наиболее эффективным способом передачи электроэнергии нагрузке постоянным током является способ предполагающий использование земли в качестве проводника, позволяющий повысить пропускную способность линии электропередачи в 2,34 раза, а среди способов передачи, использующих только существующие провода, самым эффективным по критерию увеличения коэффициента передачи по мощности (в 1,11 раз) является способ передачи по схеме «один прямой, два обратных», с перегрузкой проводов по току;

ГЛАВА 4 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ В РЕЖИМЕ ПОВТОРНО-КРАТКОВРЕМЕННОЙ ПЕРЕГРУЗКИ

В главе представлены результаты исследования на имитационной модели системы электроснабжения предприятия, включающей линию электропередачи постоянного тока, передающей электроэнергию по трем проводам по схеме «один прямой, два обратных» в повторно-кратковременном режиме с перегрузкой проводов по току и нагрузке с учетом преобразования рода тока. Модель разработана в программном пакете Simulink MATLAB.

При перегрузке линии электропередачи количество теплоты, выделяемое в проводе (фактически потери электроэнергии при передаче), увеличивается, что ведет к росту рабочей температуры проводов и ускоряет тепловые переходные процессы. Для того, чтобы оценить действенность предложенного в предыдущей главе повторно-кратковременного режима работы трехпроводной линии было проведено имитационное моделирование.

Таким образом, цель имитационного моделирования – показать работу предлагаемого способа в динамике переключения проводов линии электропередачи и вызываемых при этом изменений токов, напряжений и температуры проводов. Поставленная цель позволяет проводить моделирование процессов коммутации устройств силовой электроники и тепловых процессов с некоторыми допущениями.

В модели инвертор и выпрямитель представлены системой идеальных ключей, свойства которых значительно отличаются от свойств полупроводниковых устройств, применяемых в силовой электронике. Среди основных особенностей идеальных ключей, представляющих собой математическую абстракцию, можно выделить отсутствие внутреннего сопротивления, прямого падения напряжения и возможность работы во всех

четырёх квадрантах вольт-амперной характеристики. Применение их обусловлено тем, что для моделирования передачи электроэнергии постоянным током по схемам, предполагающим переключение между проводами линии, не требуется обеспечивать строгость процессов открытия и закрытия ключей, достаточно показать их функцию в процессе передачи и принцип работы устройства, осуществляющего переключение.

При детальном рассмотрении процесса нагрева изоляции требуется учитывать распределение температуры в объеме изоляции (в случае кабельных линий) [97]. Так как феномен распределения температуры в диэлектрике оказывает лишь незначительное влияние на сущность рассматриваемых процессов, в работе было принято допущение, что температуры линии электропередачи и температура окружающей среды одинаковы во всех точках занимаемого ими объема.

Следующим допущением является отсутствие колебаний и отклонений постоянного напряжения в точке подключения линии к системе электроснабжения. Эта условность позволяет сосредоточить внимание на принципе передачи электроэнергии непосредственно, и призвана упростить как процесс моделирования, так и процесс анализа его результатов. По той же причине предполагается, что поток мощности, передаваемый по линии электропередачи, постоянен.

Известно явление повышения удельного сопротивления металла при росте его температуры. Это явление в небольшом диапазоне температуры ведет к незначительному повышению сопротивления провода (менее чем в два раза при нагреве на 200°) [98]. Так как рассматриваемые процессы предполагают повышение температуры проводов линии электропередачи в пределах 50° , то описанное явление в ходе моделирования можно не учитывать.

При расчете нагрева проводников кабельных линий электропередачи, в общем случае следует учитывать теплообмен между проводами. При

построении модели было сделано допущение, что теплообмен между проводами линии отсутствует.

Так как в исследовании рассматриваются линии электропередачи среднего уровня напряжения, принято допущение о том, что протяженность их невелика и процессами распространения волн вдоль линии можно пренебречь. Поэтому линия электропередачи может быть представлена схемой с сосредоточенными параметрами.

Согласно [38] собственная емкость проводов не оказывает определяющего влияния на переходный процесс в линии электропередачи, поэтому при моделировании проводов учитывается только их активное сопротивление и индуктивность.

4.1 Схема замещения на основе электротепловой аналогии

Процесс нагрева провода в рамках принятых допущений описывается дифференциальным уравнением (теплотехнические величины отмечены индексом T):

$$I_d^2 \cdot R_\lambda = \frac{\Delta T_T(t)}{R_T} + C_T \frac{d\Delta T_T(t)}{dt}, \quad (4.1.1)$$

где R_T – это тепловое сопротивление измеряемое в $^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$, $\Delta T(t)$ – разность температур провода и окружающей среды, измеряемая в $^{\circ}\text{C}$, C_T – теплоемкость провода, измеряемая в $\text{Дж}/^{\circ}\text{C}$, t – время в секундах.

Из уравнения 4.1.1 видно, что температура, до которой нагревается провод, зависит от интенсивности теплообмена с окружающей средой, что отражено коэффициентом $1/R_T$. Скорость нагрева пропорциональна теплоемкости провода. В принятой упрощенной модели нагрева провода эти два фактора полностью определяют динамику процесса.

Также следует отметить, что постоянные времени рассматриваемых в модели электрических цепей много меньше постоянной времени нагрева провода, поэтому нарастание и спад тока происходят в квазистатическом состоянии температуры и, следовательно, активного сопротивления провода,

что служит дополнительным обоснованием принятого допущения о том, что при изменении температуры провода его активное сопротивление остается неизменным.

Для моделирования процесса динамического нагрева провода был использован метод электротепловой аналогии. В схеме замещения на рисунке 4.1.1 управляемый источник тока соответствует количеству теплоты, выделяющемуся в проводе, напряжение на емкости соответствует разности температуры провода и окружающей среды, активное сопротивление отражает поток теплоты, передаваемый в окружающее пространство.

Исходной величиной для расчета температуры при моделировании служит ток провода линии электропередачи. В соответствии с принятым допущением о том, что сопротивление провода при нагреве не увеличивается, количество теплоты, выделяемое при нагреве провода током, также остается неизменным. Поэтому в схеме замещения использован источник тока, а теплота пропорциональна квадрату тока, протекающего по проводам, и активному сопротивлению провода. Теплоемкость, активное и тепловое сопротивления провода, должны быть определены и заданы в соответствующих блоках до начала моделирования.

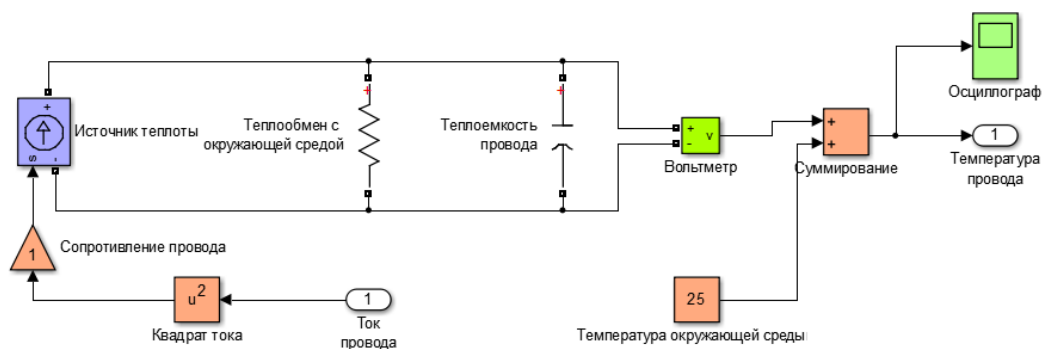


Рисунок 4.1.1 – Модель нагрева проводов, построенная по способу электротепловой аналогии

Напряжение, снимаемое с емкости на схеме замещения 4.1.1, соответствует разнице температуры провода и окружающей среды, поэтому, чтобы получить фактическую температуру провода в распределительной

сети, разность температур суммируется с температурой окружающей среды, которая задается константой и определяется до начала моделирования. В рассматриваемом случае, температура окружающей среды принята равной 25°C.

На рисунке 4.1.1 представлена диаграмма, отражающая интенсивность нарастания температуры провода при протекании по нему тока. Видно, что постоянная времени нагрева проводов соответствует реальным значениям [97], и что за время моделирования переходный процесс полностью завершился. Это позволяет сравнить температуру проводов трехпроводной линии электропередачи, работающих в повторно-кратковременном режиме с температурой проводов трехфазной линии электропередачи, работающей в нормальном режиме.

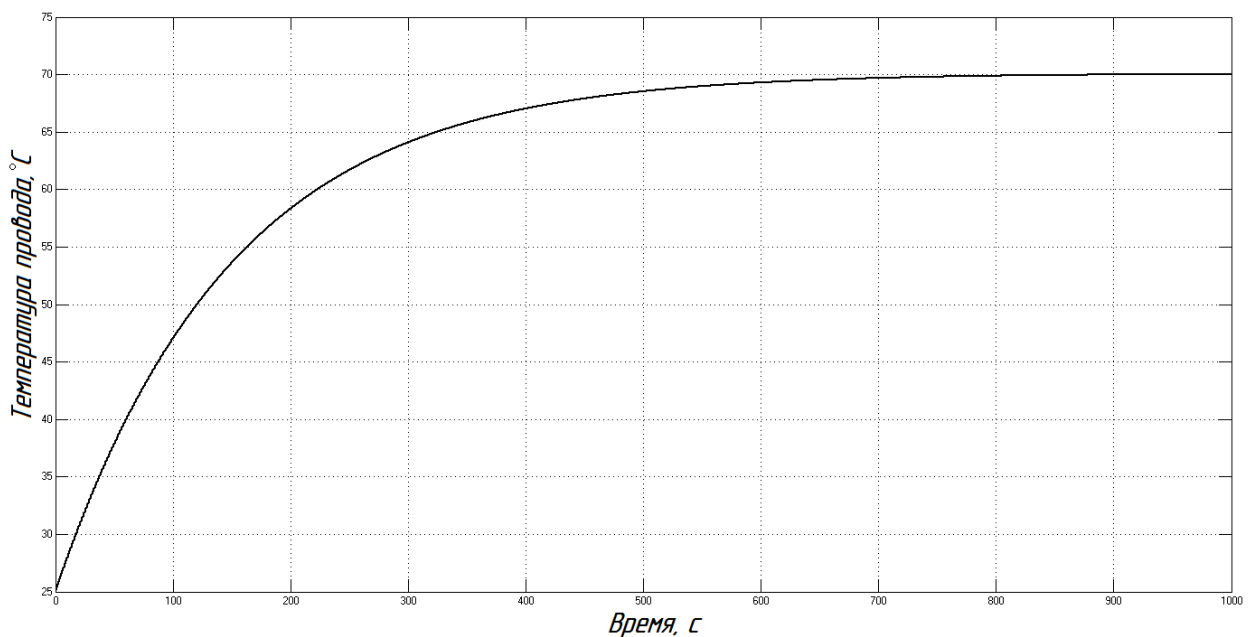


Рисунок 4.1.2 – Диаграмма изменения температуры провода под действием электрического тока

Представленная в разделе тепловая модель, построенная на электротепловой аналогии, описывает изменение температуры провода при протекании по нему тока адекватно целям моделирования. Она была включена в модель линии постоянного тока для анализа процесса нагрева и охлаждения проводов в динамике их переключения.

4.2 Структура модели передачи электроэнергии нагрузке по трехпроводной линии постоянным током

Введенная в предыдущем разделе тепловая модель, основанная на электротепловой аналогии, была применена при имитационном моделировании трехпроводной линии 10 кВ (линейное переменное напряжение), разработанной в программном пакете MATLAB. Для сравнения пропускной способности одной и той же линии при передаче электроэнергии разными способами, параллельно проводилось моделирование системы переменного тока. При этом предполагалось, что линия переменного тока работает с единичными коэффициентами запаса по току и по напряжению ($K_H=1; K_T=1$). Коэффициент запаса по мощности (формула 3.4.11) в этом случае равен единице. Это значит, что передаваемая по линии электропередачи активная мощность достигла величины, соответствующей ее пропускной способности. Это условие также означает то, что по проводам протекает максимально допустимый по нагреву ток и температура проводов в установившемся режиме также не превышает максимально допустимого значения. Напряжение в начале линии в каждом из моделируемых случаев на 10% превосходит номинальное, а в конце линии ниже номинального на 10%, что соответствует максимально допустимому напряжению в системе электроснабжения и минимально допустимому в точке присоединения. Так как в исследовании решающее значение имеет передаваемая по линии активная мощность, был смоделирован режим, в котором реактивная мощность по линии переменного тока не передается.

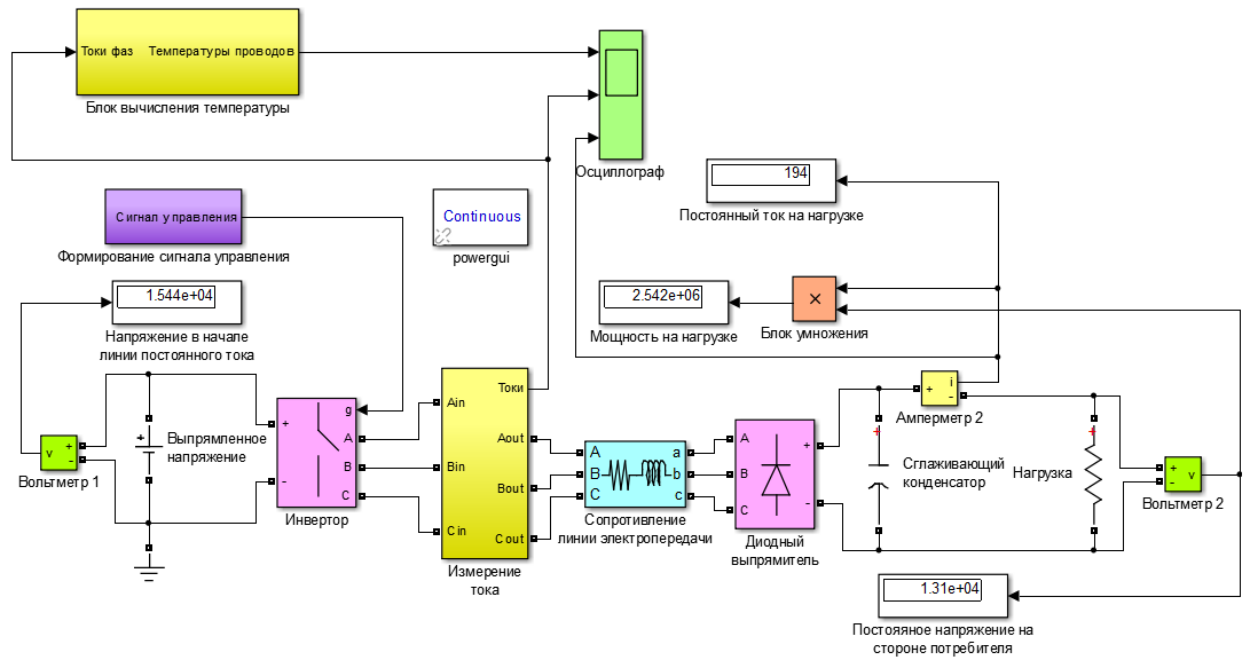


Рисунок 4.2.1 – Модель трехпроводной линии постоянного тока

Структурно модель, представленная на рисунке 4.2.1, включает в себя силовую часть, блок управления, блок расчета температуры проводов и систему блоков измерения и контроля. Силовая часть состоит из источника постоянного напряжения, инвертора с идеальными ключами, блока сопротивлений трехпроводной линии электропередачи, диодного выпрямителя, сглаживающего конденсатора и активной нагрузки. Использование источника постоянного напряжения в модели обусловлено сделанным допущением о том, что отклонения и колебания питающего напряжения отсутствуют.

Как было отмечено в начале главы, инвертор был смоделирован на основе идеальных ключей, его принципиальная схема приведена на рисунке 4.2.2. Инвертор состоит из трех полумостов, что позволяет ему переключать провода для передачи электроэнергии постоянным током в повторно-кратковременном режиме с перегрузкой по току.

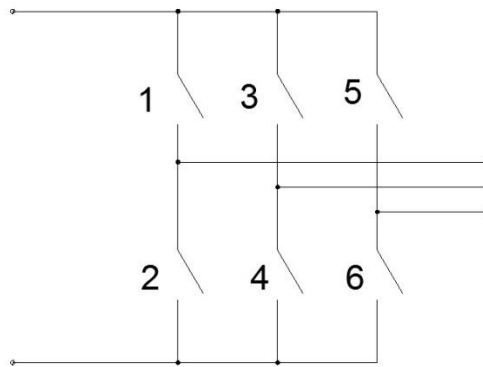


Рисунок 4.2.2 – Принципиальная схема инвертора с идеальными ключами

Параметры проводов линии электропередачи имитирует блок сопротивлений. В соответствии с принятым допущением провода описаны только активным сопротивлением и индуктивностью. В конце линии установлен выпрямитель. Выпрямитель на основе идеальных диодов был выбран в качестве преобразователя на стороне нагрузки, чтобы продемонстрировать возможность применения в схеме электропередачи преобразователя управляемого напряжением.

К выходу выпрямителя подключен сглаживающий конденсатор, задачей которого является поддержание напряжения на нагрузке в течение переходных процессов, вызванных коммутацией. В соответствии с принятым допущением о постоянстве потока активной мощности нагрузки, в модели роль потребителя электроэнергии выполняет активное сопротивление.

Измерение токов и напряжений линии электропередачи, а также вычисление активной мощности осуществляется средствами системы контроля и измерения, включающей в свой состав амперметр, вольтметры и дисплеи, отображающие измеряемые величины. Первый вольтметр измеряет напряжение в начале линии, и призван показать, что оно не превышает допустимых значений. Второй вольтметр измеряет напряжение в конце линии электропередачи, и передает результат для отображения на дисплее и вычисления активной мощности, потребляемой нагрузкой. Амперметр, измеряющий ток нагрузки, передает данные для отображения на дисплее, вычисления активной мощности, потребляемой нагрузкой, и отображения в

окне осциллографа. Блок измерения токов, функциональное назначение которого состоит в измерении мгновенных значений токов, протекающих по проводам линии электропередачи, и передаче измеренных данных другим блокам и системам, конструктивно включает в себя три амперметра, подключенных к трем проводам линии соответственно. Сигнал, содержащий информацию о мгновенном значении токов проводов, передается в осциллограф и блоку вычисления температуры.

Блок вычисления температуры включает в себя три модели, основанные на электротепловой аналогии, представленные в предыдущем разделе. В них вычисляется температура каждого из проводов в отдельности, затем полученные данные отображаются в окне осциллографа в виде диаграммы.

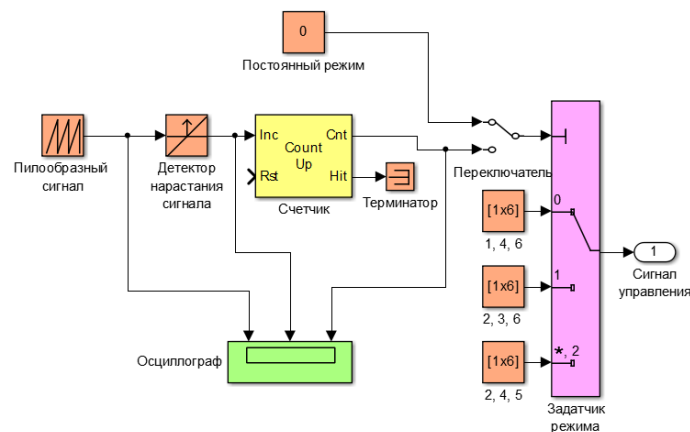


Рисунок 4.2.3 – Модель блока формирования сигнала управления

Блок формирования сигнала управления формирует и передает управляющие сигналы идеальному инвертору. Состояние инвертора определяется матрицами нулей и единиц, размерностью 1×6 . Элементы матрицы соответствуют ключам инвертора, единица означает, что ключ замкнут, а ноль, что ключ разомкнут. Всего при передаче электроэнергии постоянным током по трем проводам возможны три состояния ключей инвертора, соответствующие трем режимам работы линии электропередачи, рассмотренным в предыдущей главе (рисунок 3.6.3), эти состояния записаны

в блоки состояний, обозначенные тремя цифрами, через запятую (блок 1,4,6, блок 2,3,6 и блок 2,4,5, цифры в названии блоков соответствуют номерам замкнутых ключей инвертора). На вход задатчика режима приходит сигнал, уровень которого определяет состояние инвертора. Для нормальной работы системы управления, входящий сигнал задатчика режима должен изменяться в пределах от нуля до двух. Такой диапазон значений обеспечивается цифровым счетчиком, который инкрементирует величину выходного сигнала, когда на вход Inc приходит управляющий импульс. Если величина выходного сигнала счетчика равна двум и на вход приходит управляющий импульс, то счетчик сбрасывает выходной сигнал до нуля.

Предполагается, что состояние инвертора изменяется периодически, для того, чтобы этого добиться, в модель включена система формирования управляющих импульсов. Она состоит из блока генератора пилообразного напряжения и блока детектора нарастания сигнала. Полярность пилообразного сигнала периодически изменяется и при изменении значения сигнала с отрицательного на положительное, детектор нарастания сигнала выдает управляющий импульс.

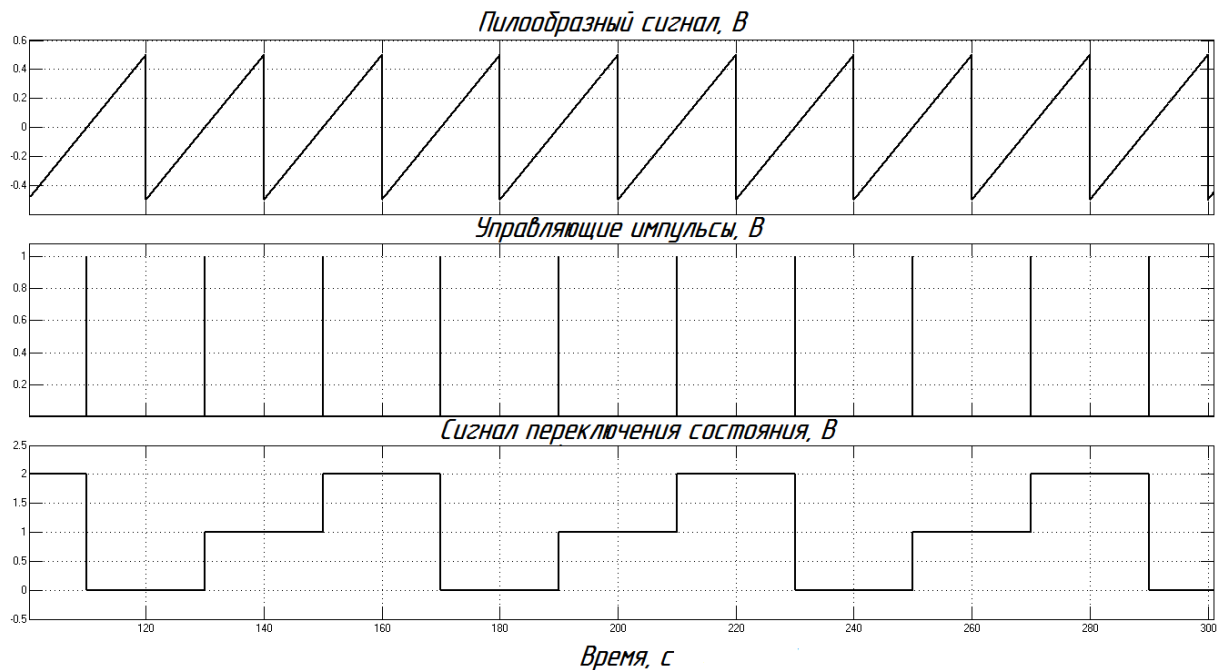


Рисунок 4.2.4 – Формы сигналов управления

На рисунке 4.2.4 представлены диаграммы изменения управляющих сигналов от времени при нормальной работе системы управления. Из диаграмм видно, что сигналы изменяются в соответствии с заданием, так что на вход датчика режимов поочередно и с равным периодом приходят сигналы переключения состояния, определяющие режим работы инвертора, а значит и линии электропередачи.

Помимо режима последовательного переключения состояний инвертора существует возможность выбрать одно из трех заранее заданных для моделирования режимов «один прямой, два обратных» без переключения проводов. Для этого в систему управления включен блок «Постоянный режим».

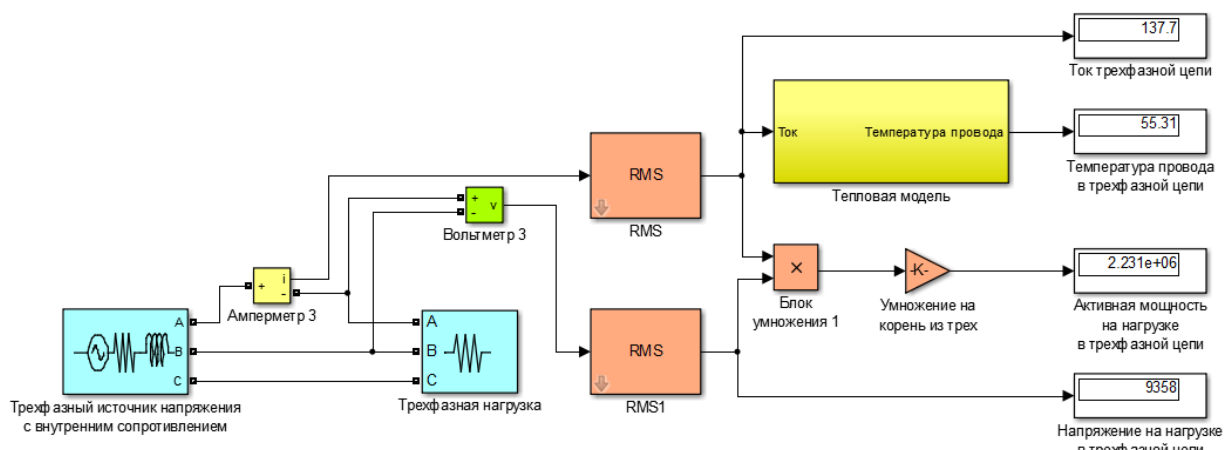


Рисунок 4.2.5 – Модель трехфазной линии электропередачи

Далее рассмотрим модель трехфазной трехпроводной линии переменного тока, она представлена на рисунке 4.2.5. По аналогии с моделью линии постоянного тока структурно она включает в себя силовую часть, блоки измерения и контроля и блок определения температуры проводов. Последний представляет собой тепловую модель, описанную ранее. Так как нагрузка, подключенная к линии электропередачи симметрична и, согласно принятому допущению, постоянна, то по всем трем проводам линии электропередачи, протекает одинаковый ток, поэтому для определения передаваемой мощности и температуры проводов достаточно информации о токе только одной фазы. Эти данные модель получает из третьего

амперметра и третьего вольтметра, измеряющего напряжение на нагрузке. Для определения активной мощности, передаваемой нагрузке по трехфазной линии переменного тока, действующие значения линейного напряжения и линейного тока умножаются на коэффициент, равный квадратному корню из трех.

Силовая часть модели линии переменного тока состоит из двух блоков: источника напряжения с ненулевым внутренним сопротивлением и блока нагрузки. В соответствии с принципом структурной простоты, сопротивление линии электропередачи было учтено в составе внутреннего сопротивления источника.

Модель линии распределительной сети построена в соответствии принятыми допущениями, что определяет ее специфичность. Структурная простота и возможность реализации различных способов передачи позволяет применять ее для моделирования работы линии электропередач всех уровней напряжения среднего класса.

4.3 Моделирование процессов передачи электроэнергии постоянным током

Для моделирования были выбраны следующие параметры линии электропередачи: линейное напряжение – 10 кВ, отношение реактивного сопротивления линии электропередачи к активному равно единице, пропускная способность линии на переменном токе равна 2,231 МВт. Для того чтобы лучше раскрыть сущность способа передачи электроэнергии, моделирование проводилось в несколько этапов. На первом этапе был смоделирован режим работы линии при передаче электроэнергии постоянным током по схеме «один прямой, два обратных». На этом этапе передаваемая активная мощность была ограничена только падением напряжения в линии. На втором этапе был смоделирован режим передачи аналогичный предыдущему, но с периодическим переключением проводов без снижения передаваемой мощности. На третьем этапе передаваемая по

линии постоянного тока мощность была снижена до достижения токов, максимально допустимых по условию нагрева проводов. Четвертый этап моделирования показывает выбор эффективной частоты переключения проводов и эффект, оказываемый им на передачу электроэнергии. На всех этапах моделирования оценивалось увеличение пропускной способности линии электропередачи и коэффициента запаса по мощности.

4.3.1 Передача электроэнергии постоянным током по схеме «один прямой два обратных» при условии бесконечно большого коэффициента запаса линии по току

На рисунке 4.3.1 представлены результаты моделирования работы трехпроводной линии электропередачи в режиме «один прямой, два обратных». Из первой диаграммы видно, что ток одного из проводов в два раза превосходит ток в двух других, что ведет к значительной разнице температур между ними. Необходимо отметить, что температура двух других проводов ниже, температуры установившейся в ходе нагрева провода линии переменного тока (рисунок 4.1.2), это обуславливает возможность охлаждения проводов в ходе передачи электроэнергии предлагаемым способом.

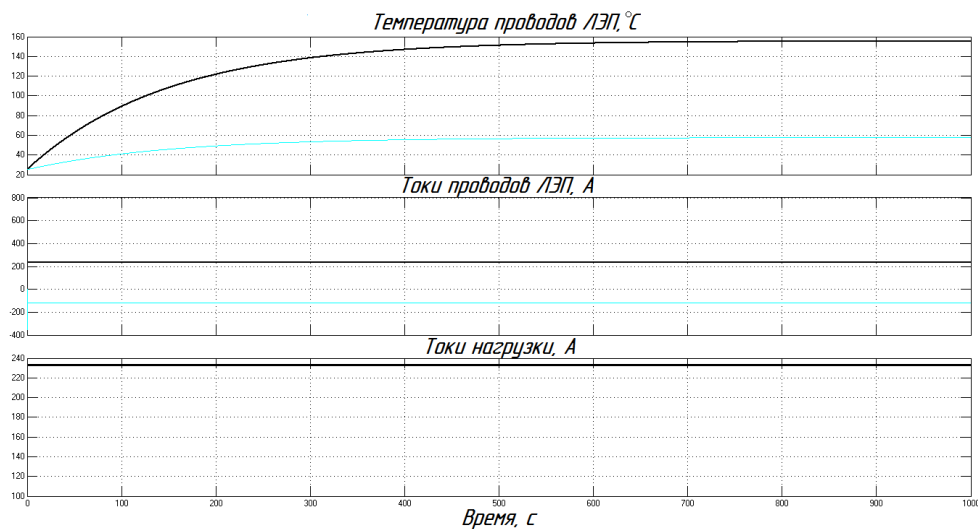


Рисунок 4.3.1 – Температуры и токи трехпроводной линии при передаче электроэнергии способом «один прямой, два обратных» без переключения проводов

Передаваемая в этом режиме по линии электропередачи постоянного тока активная мощность равна 2,95 МВт. Таким образом, коэффициент запаса линии электропередач по напряжению равен 1.32, что полностью соответствует теоретическим результатам (рисунок 3.6.4).

4.3.2 Передача электроэнергии постоянным током в режиме повторно-кратковременной перегрузки проводов при условии бесконечно большого коэффициента запаса линии по току

При переключении проводов в системе периодически происходят переходные процессы. Электрический переходный процесс в описываемой системе протекает сложно, в несколько этапов. В момент переключения проводов по ним протекают постоянные токи, величина которых пропорциональна магнитным потокам вокруг проводов, а в соответствии с первым законом коммутации потокосцепление не может изменяться скачком [99]. После коммутации ток протекает через конденсатор и разряжает его, затем, когда токи линии и нагрузки сравниваются, начинается заряд конденсатора. Математически это описывается уравнением по первому закону Кирхгофа:

$$C \frac{dU_c(t)}{dt} = i_d(t) - \frac{P}{U_c(t)}, \quad (4.3.1)$$

где $U_c(t)$ – напряжение на конденсаторе.

Диаграмма зависимости напряжения на сглаживающем конденсаторе от времени представлена на рисунке 4.3.2. На диаграмме хорошо видны начало и конец переходного процесса, а также момент перегиба, когда заканчивает разряд и начинается заряд конденсатора, (уравнение 4.3.1). Следует отметить, что процесс нарастания тока в проводах линии происходит в десятки раз быстрее заряда емкости.

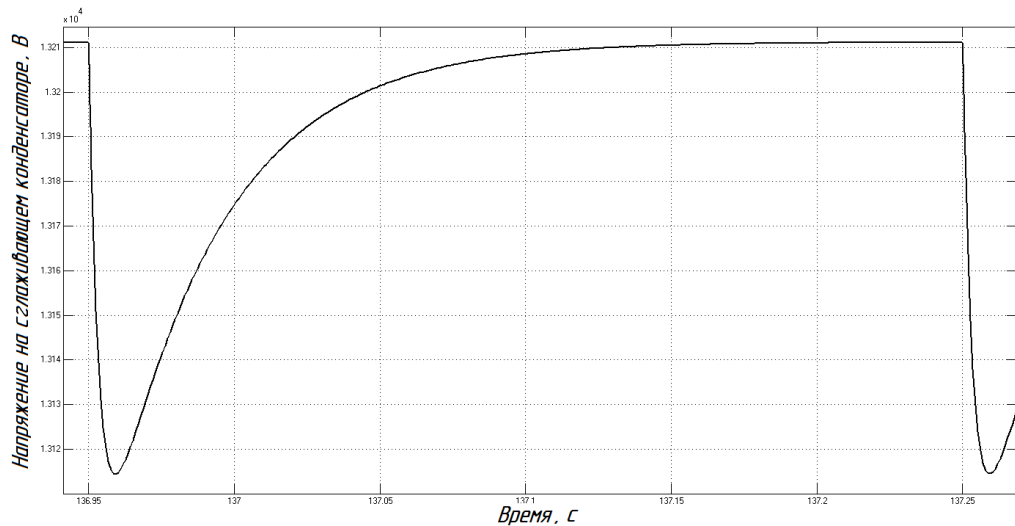


Рисунок 4.3.2 – Зависимость напряжения на сглаживающем конденсаторе от времени

Получить функции токов линии и напряжения на конденсаторе в ходе переходного процесса можно, составив уравнение по второму закону Кирхгофа для схемы на рисунке 4.3.3.

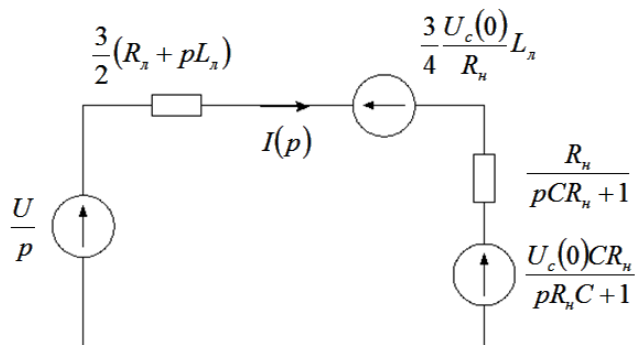


Рисунок 4.3.3 – Схема замещения электрической цепи в операторной форме

Ток линии при этом определяется из уравнения:

$$I(p) = \frac{U \left(\frac{3}{2} R_n C p + 1 \right) - \frac{3 \cdot U_c(0)}{4 \cdot R_n} L_n \left(p^2 \cdot R_n C + p \right) - p \cdot U_c(0) C R_n}{p \left(\frac{3}{2} R_n + p L_n \left(\frac{3}{2} R_n C p + 1 \right) + R_n \right)}, \quad (4.3.2)$$

где U_c – это напряжение на конденсаторе в момент коммутации, R_n – сопротивление нагрузки.

Характер и длительность переходного процесса, определяются емкостью конденсатора, который следует выбирать по допустимой глубине

провалов постоянного напряжения на нагрузке. Установить необходимую емкость конденсатора можно с помощью уравнения 4.3.3:

$$U_c(p) = \frac{U_c(0)CR_n}{p \cdot R_n C + 1} - I(p) \frac{R_n}{p \cdot R_n C + 1}, \quad (4.3.3)$$

или пользуясь упрощенным методом, основанным на следующих соображениях. Время нарастания токов в проводах линии электропередачи много меньше времени заряда конденсатора, поэтому можно описать ток линии электропередачи уравнением только с одной свободной составляющей:

$$i_L(t) = I_d - \frac{3}{2} I_d e^{-\frac{R_n}{L_n} t}. \quad (4.3.4)$$

Пренебрегая другими причинами уменьшения заряда на обкладках конденсатора, помимо обратных токов проводов (уравнение 4.3.2):

$$\int_0^{t_{nm}} i_L dt = C \cdot \Delta U, \quad (4.3.5)$$

где t_{nm} – время, за которое токи в линии достигают нулевых значений.

Выражая из уравнения 4.3.5 емкость:

$$C = \frac{1}{R_n \cdot k_u} \frac{L_n}{R_n} 0.9, \quad (4.3.6)$$

где k_u – отношение допустимой величины провала напряжения к величине постоянного напряжения на конденсаторе.

При моделировании было принято условие, что глубина провала напряжения в ходе коммутации не должна превышать одного процента от установившегося значения. Согласно формуле 4.3.6, емкость сглаживающего фильтра при этом равна 3 мФ.

На рисунке 4.3.4 приведены зависимости токов и температур проводов от времени при работе линии в повторно-кратковременном режиме.

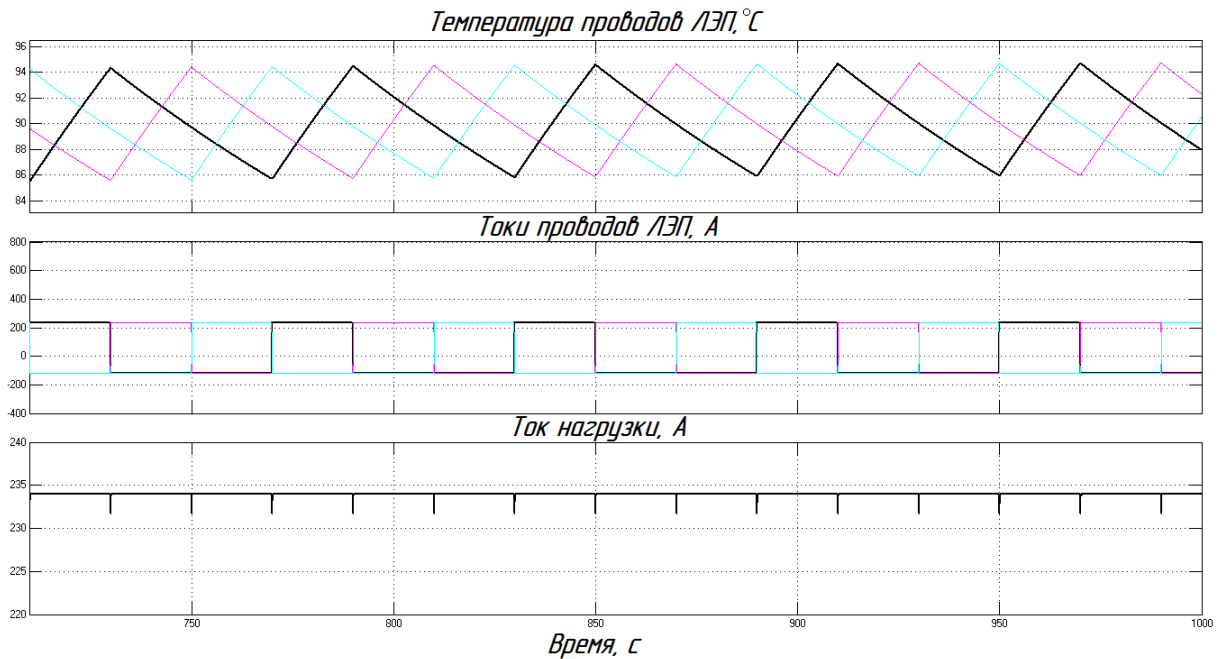


Рисунок 4.3.4 – Температура и токи трехпроводной линии при передаче электроэнергии способом «один прямой, два обратных» с переключением проводов

Видно, что в режиме переключения проводов, их температуры колеблются около среднего значения. Математически это можно описать, выделив постоянную составляющую и переменную составляющие температуры провода:

$$T_T \text{ (с)} = T_{T_{уст}} + T_{T_{кол}}(t), \quad (4.3.7)$$

где $T_T \text{ (с)}$ – температура провода линии, $T_{T_{уст}}$ – постоянная составляющая температуры провода линии, $T_{T_{кол}}(t)$ – переменная составляющая температуры провода линии.

Введем некоторые обозначения для дальнейших исследований. Пусть амплитуда колебаний переменной составляющей температуры провода определена как:

$$T_{T_{кол}} \in [T_{T_{откл}}; +T_{T_{откл}}], \quad (4.3.8)$$

где $T_{T_{откл}}$ – положительное рациональное число.

Тогда температура проводов изменяется в пределах от $T_{T_{\min}}$ до $T_{T_{\max}}$ таких что:

$$\begin{cases} T_{T_{\min}} = T_{T_{уст}} - T_{T_{откл}}; \\ T_{T_{\max}} = T_{T_{уст}} + T_{T_{откл}}. \end{cases} \quad (4.3.9)$$

При этом:

$$\frac{1}{T} \int_0^T T_{T_{кол}}(t) dt = 0. \quad (4.3.10)$$

Последнее уравнение показывает, что рост температуры за первую треть периода равен спаду температуры последние две трети периода.

Видно, что постоянная составляющая температуры каждого из проводов равна, однако все еще больше предельно допустимой, поэтому, для нормальной работы линии электропередачи требуется снизить передаваемую активную мощность.

4.3.3 Передача электроэнергии постоянным током в режиме повторно-кратковременной перегрузки проводов при условии, что коэффициент запаса линии по току до перевода был равен единице

Передаваемая активная мощность равна 2,446 МВт, напряжение на нагрузке равно 13,21 кВ, что составляет 94% по отношению к номинальному напряжению. На этом этапе моделирования передаваемая по линии активная мощность была снижена до величины, при которой температура проводов не превышает температуры проводов линии переменного тока и, соответственно эксплуатируется в нормальных условиях. Важно не превышать некоторого значения температуры.

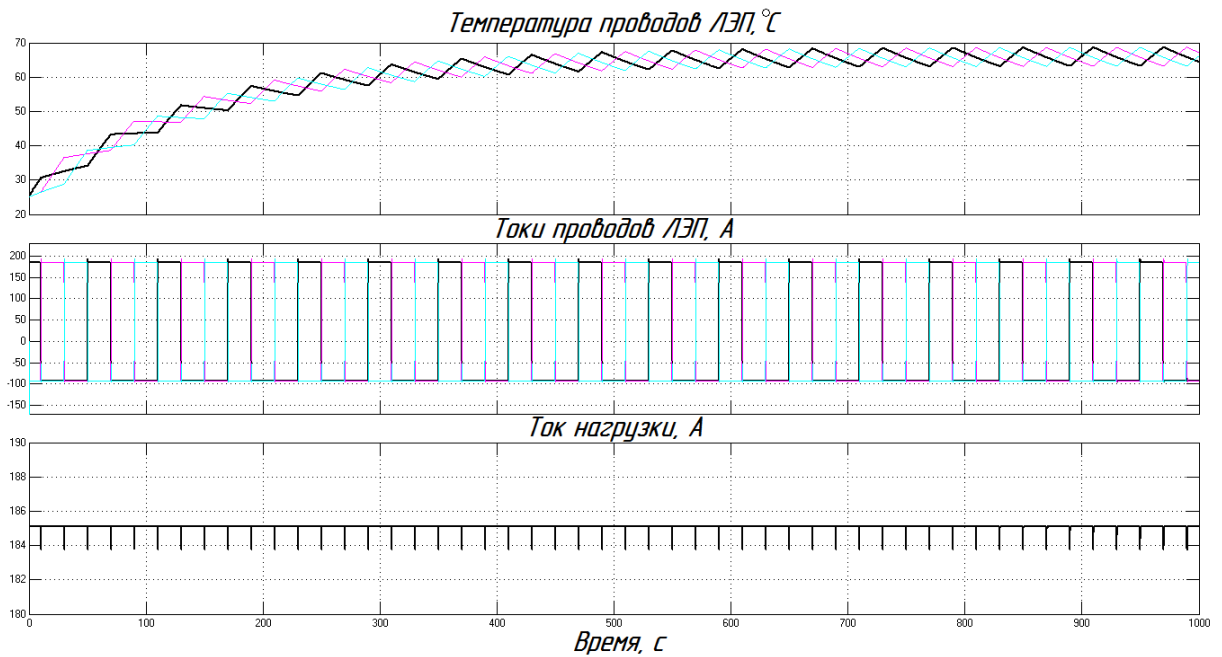


Рисунок 4.3.5 – Температуры и токи трехпроводной линии при передаче уменьшенной мощности способом «один прямой, два обратных» с переключением проводов

Коэффициент запаса по мощности, и, соответственно, пропускная способность линии электропередачи в этом случае уменьшилась на 21,8% по сравнению с первым и вторым этапами эксперимента (проценты вычислены по отношению к пропускной способности линии переменного тока), в которых ток, протекающий по проводам, не ограничивался. Однако, пропускная способность линии, работающей в таком режиме превосходит пропускную способность линии переменного тока на 9,2%.

Видно также, что передаваемую мощность можно увеличить, если уменьшить амплитуду колебаний температуры и приблизив постоянную составляющую температуры проводов к пределу по нагреву. Однако для этого требуется решить задачу выбора периода переключения проводов линии электропередачи, чему посвящен следующий раздел.

4.3.4 Передача электроэнергии постоянным током в режиме повторно-кратковременной перегрузки проводов с оптимальным периодом их переключения

Согласно уравнениям 4.3.7 и 4.3.10 изменение температуры за периоды нагрева и охлаждения, в пределах, обозначенных в выражении 4.3.8 равно:

$$2T_{T_{откл}} = \frac{T}{3} \cdot \frac{(I_d^2 - I_{уст}^2) R_{\lambda}}{C_T} = \frac{T}{6} \cdot \frac{(I_{уст}^2 - I_d^2) R_{\lambda}}{C_T}, \quad (4.3.11)$$

где $I_{уст}$ – это постоянный ток, соответствующий $T_{T_{уст}}$.

Из уравнения 4.3.11, ток $I_{уст}$ равен:

$$I_{уст} = \frac{I_d}{\sqrt{2}} = \sqrt{\frac{T_{T_{уст}} - T_{T_{о.с.}}}{R_{\lambda} R_T}}, \quad (4.3.12)$$

где $T_{T_{о.с.}}$ – температура окружающей среды.

Выражение 4.3.12 по существу соответствует выражению 3.6.5, представленному в третьей главе. Формула 4.3.11 устанавливает зависимость между амплитудой колебаний переменной составляющей температуры и периодом переключения проводов. Наклон линеаризованной функции при этом прямо пропорционален тепловым потерям и обратно пропорционален теплоемкости провода. Из этого можно сделать вывод, что для обеспечения минимальных по амплитуде колебаний температуры, период переключения проводов должен быть максимально малым, однако не меньше длительности переходного процесса в проводах линии электропередачи и сглаживающем конденсаторе.

Время заряда конденсатора определяется в основном его емкостью и активным сопротивлением проводов линии электропередачи, поэтому треть периода переключения проводов должна быть дольше пяти постоянных времени заряда, чтобы напряжение на грузке достигло принужденного значения, следует учесть, что активное сопротивление проводов складывается из сопротивлений проводников обеспечивающих прямой и обратные токи:

$$\frac{1}{3}T \geq 5 \cdot \frac{3}{2} \cdot R_d C \quad (4.3.13)$$

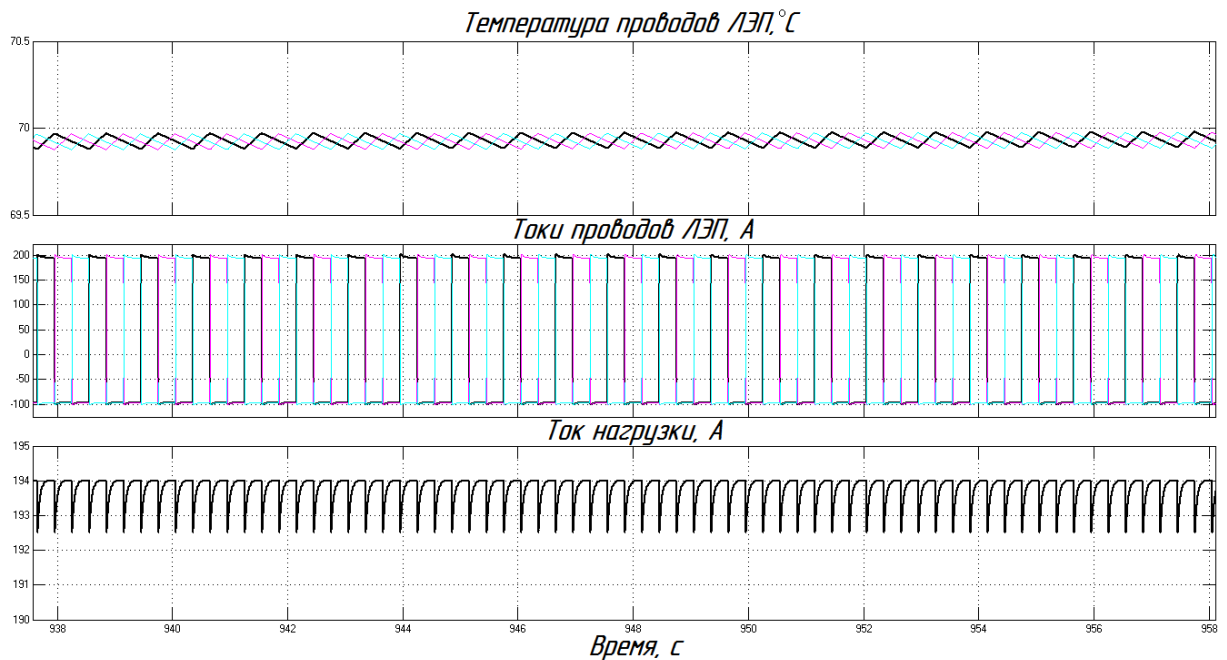


Рисунок 4.3.6 – Температуры и токи трехпроводной линии при передаче электроэнергии способом один прямой, два обратных с переключением проводов с оптимальным по скорости заряда сглаживающего конденсатора периодом

Выбранный таким способом период является минимально допустимым по условию нормального заряда конденсатора. Полученные временные зависимости подтверждают результативность предложенного метода. По результатам расчета период переключения был принят равным 900 мс (выражение 4.3.13), что отражено на графике заряда и разряда конденсатора представлен на рисунке 4.3.1. Максимальная температура при этом равна 70°C, а минимальная 69,92°C, что соответствует результатам моделирования, отображенным на рисунке 4.3.6.

Результаты моделирования подтверждают тезис о том, что передаваемая активная мощность может быть увеличена за счет уменьшения амплитуды колебаний температуры. При моделировании с периодом, вычисленным в соответствии с критерием завершения заряда конденсатора, (рисунок 4.3.2) максимальная температура проводов линии электропередачи

уменьшилась, что позволило увеличить передаваемую по линии электропередачи активную мощность с 2,446 МВт до 2,542 МВт, что больше предыдущего значения на четыре процента. Таким образом, передаваемая активная мощность была увеличена на 14% по отношению к линии переменного тока (2,231 МВт).

4.4 Применение методики повышения передаваемой активной мощности электротехнического комплекса к промышленному объекту

Для подтверждения результатов исследования был сделан расчет увеличения передаваемой активной мощности участка системы электроснабжения «Воргашорской» угольной шахты. Представленная шахта характеризуется преобладающей долей кабельных линий. При достаточной их протяженности создается большое падение напряжения, что негативно сказывается на передаваемую активную мощность. В приложении 1-3 представлены схемы электроснабжения участка шахты от главной распределительной подстанции (ГПП) 100/6 кВ через главные подстанции 140-2 и 140-1 до распределительной подстанции (РПП) на участке разработки шахты. Суммарная протяженность кабельной линии до РПП составляет 11 км.

В пакете программ Matlab Simulink была сформирована имитационная модель распределительной сети до участка, согласно эквивалентной схеме распределительной сети (рисунок 4.4.1)

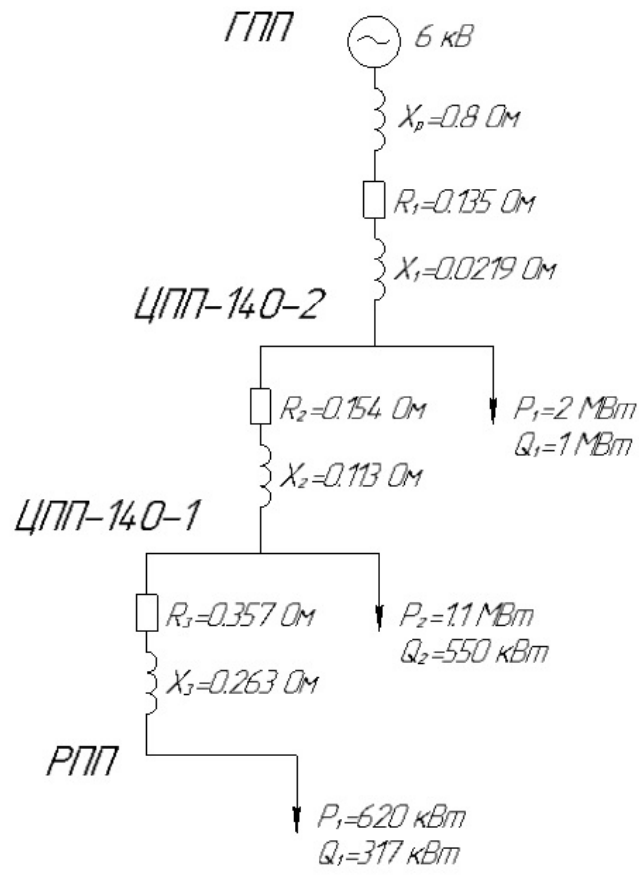


Рисунок 4.4.1 – Эквивалентная схема участка распределительной сети
Воргашорской шахты

Согласно приложениям 1-3 электропитание осуществляется посредством медных трехжильных кабельных линий $2 \times 120 \text{ мм}^2$. Расстояние от ГПП 110/6кВ до ЦПП 140-2 составляет 0,6 км. Расстояние от ЦПП 140-2 до ЦПП 140-1 составляет 3,1 км. От ЦПП 140-1 до РПП на участке разработки – 7,2 км. Расчетная величина напряжения на РПП, полученная в результате моделирования составила 4381 В, что недопустимо по ГОСТу, т.к. падение напряжения составляет 17%.

Рассмотрим представленные выше средства повышения передаваемой активной мощности. Применение ВДТ, подключаемого в линию, питающую РПП, позволит увеличить напряжение при полной нагрузке на 5% при условии, что на холостом ходу напряжение повысится на 7%, что удовлетворяет критерию запаса по напряжению. Следует отметить, что при

этом возрастает ток в линии. В этом случае, согласно выражению 2.1.11 увеличение передаваемой активной мощности составит 8,3%.

Совместное применение продольно-поперечной компенсации имеет высокие показатели по уменьшению падения напряжения. Для компенсации предлагается включить УПК в линию между ГПП и ЦПП-140-2 с параметрами (согласно разделу 2.1) $X_{\text{упк}}=0,65$ Ом и регулируемую УПОК, номинальной мощностью $Q_{\text{упок}}=170$ квар, обеспечивающую $\text{tg} \varphi_n$ не выше 0,4. Согласно результатам моделирования падение напряжения уменьшается до 2,41%. Компенсация только реактивного сопротивления линии до ЦПП-140-2 позволяет уменьшить падение напряжения до 4,06% на шинах РПП. В этом случае величина передаваемой активной мощности согласно выражению 2.1.11 может быть увеличена в 1,24 раза.

Третий вариант – изменение рода тока на участке от ЦПП-140-1 до РПП. При полной нагрузке на шинах ЦПП-140-1 падение напряжения будет составлять 16,8% от номинального. При смене рода тока падение напряжения за счет нивелирования реактивного сопротивления линии уменьшится. В этом случае перевод линии от ЦПП-140-1 до РПП на постоянный ток позволит увеличить передаваемую активную мощность в 2,23 раза.

Таким образом, сравнивая приведенные выше способы, следует отметить, что по критерию запаса по напряжению наиболее эффективным способом для повышения передаваемой активной мощности является изменение рода тока. Увеличение активной мощности, передаваемой в линии составляет 2,23 раза от ее величины без применения устройств компенсации, что больше чем при применении УПК и УПОК в распределительной сети на 57%. При совместном применении УПОК, УПК и отдельно ВДТ можно добиться значения падения напряжения равного нулю, однако такой метод может оказаться более затратным при уменьшении надежности системы.

Тем не менее, все приведенные способы уменьшают падение напряжения до значений, удовлетворяющих требованиям по ГОСТу.

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 4

Исходя из полученных в четвертой главе результатов, можно сделать следующие выводы:

1. На основании ряда обоснованных допущений, была разработана структура имитационной модели система электроснабжения предприятия с линией постоянного тока, учитывающая динамику нагрева проводов линии;

2. В программном пакете Simulink MATLAB проведено компьютерное моделирование, которое подтвердило адекватность полученных результатов по увеличению коэффициента запаса по мощности линии электропередачи при переводе ее на постоянный ток способом «один прямой, два обратных» с перегрузкой проводов по току;

3. Способ передачи электроэнергии постоянным током по трехпроводной линии электропередачи, предполагающий периодическое переключение проводов линии так, что один из проводов оказывается подключен к положительному полюсу, а два других к отрицательному полюсу постоянного напряжения, и в каждый момент времени по одному проводу проходит полный ток, а по двум другим его половина, обеспечивает увеличение коэффициента запаса по току по сравнению с двухпроводной линией электропередачи постоянного тока в корень из двух раз при условии сохранения режимов работы нагрузки предприятия ;

4. Разработан метод определения емкости сглаживающего конденсатора из условия допустимой глубины провалов выходного напряжения при переключении проводов линии распределительной сети, сущность которого заключается в определении заряда, отводимого с обкладок конденсатора остаточным током линии во время переходного

процесса, что является основной причиной разряда конденсатора, емкость которого определяется из отношения отбираемого заряда к допустимому провалу напряжения;

5. Результативность метода определения емкости сглаживающего конденсатора подтверждена полученными в процессе моделирования зависимостями тока нагрузки от времени;

6. Сформирован критерий выбора периода переключения проводов по условию завершения переходного процесса в цепи конденсатора, основанный на определении времени заряда конденсатора до нормального напряжения, определяемого его емкостью и активным сопротивлением проводов линии электропередачи, и выборе периода переключения проводов большего или равного этой величине;

7. Установлено, что при переводе трехпроводной линии электропередачи переменного тока на постоянный ток способом «один прямой два обратных» с переключением проводов коэффициент запаса по мощности увеличивается на 14% по сравнению с переменным током;

8. Разработанный метод оценки повышения передаваемой активной мощности был апробирован на примере распределительной сети угольной шахты «Воргашорская». Установлено, что перевод ее на постоянный ток является наиболее эффективным, при этом передаваемая активная мощность по критерию запаса по напряжению увеличивается в 2,23 раза, что больше на 57%, чем при совместном использовании УПК и УПОК.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе дано научно-техническое решение важной задачи по увеличению пропускной способности линии электропередачи электротехнического комплекса среднего напряжения без изменения сечения проводов.

Основные научные и практические выводы заключаются в следующем:

1. Обоснована актуальность и проанализированы способы повышения пропускной способности и передаваемой активной мощности линии для распределительных сетей электротехнического комплекса среднего уровня напряжения без внесения в них конструктивных изменений, к которым относятся:

- устройства продольной и поперечной компенсации;
- вольто-добавочный трансформатор;
- смена рода тока.

2. Аналитическим путем получены выражения для определения пропускной способности и передаваемой активной мощности радиальной линии электропередачи переменного тока электротехнического комплекса в зависимости от параметров линии и нагрузки. Выявлены зависимости передаваемой по линии активной мощности от $tg\varphi_n$ и $tg\varphi_l$. Установлено, что при $tg\varphi_n = 1$ и $tg\varphi_l = 2$ передаваемая активная мощность меньше пропускной способности в 3 раза.

3. Для определения передаваемой активной мощности с учетом статических характеристик нагрузки в среде MATLAB Simulink была разработана имитационная модель линии электропередачи переменного тока электротехнического комплекса промышленного предприятия, питающей активно-индуктивную нагрузку. Установлено, что определение передаваемой

активной мощности без учета статических характеристик нагрузки приводит к относительной погрешности вычислений ее значения более 10%.

4. Разработан алгоритм определения передаваемой по линии переменного тока активной мощности. Алгоритм позволяет по данным о величине номинальных значений реактивной и активной мощности нагрузки и активном и реактивном сопротивлении линии электропередачи рассчитать пропускную способность линии в составе электротехнического комплекса и передаваемую по ней активную мощность.

5. Введен критерий K_{3M} – коэффициент запаса по мощности, величина которого характеризует повышение передаваемой активной мощности при смене рода тока линии. На основании введенного критерия проведена оценка эффективности различных способов перевода линии на постоянный ток. Установлено, что наиболее эффективным по критерию увеличения передаваемой активной мощности способом перевода трехпроводной линии на постоянный ток является способ, предполагающий использование земли в качестве проводника. K_{3M} при этом увеличивается не менее чем в 2,34 раза. Вторым по эффективности является способ передачи электроэнергии способом «один прямой, два обратных» в режиме повторно-кратковременной перегрузки проводов. K_{3M} при этом увеличивается не менее чем на 11%.

6. Разработан метод определения емкости сглаживающего конденсатора, применяемого в трехпроводной линии постоянного тока электротехнического комплекса для поддержания напряжения на нагрузке, и оптимального по длительности периода переключения проводов линии электропередачи, при передаче по линии постоянным током в режиме повторно-кратковременной перегрузки. Емкость конденсатора выбирается из максимально-допустимого падения напряжения на нагрузке, с учетом передаваемой по линии активной мощности, а также параметров самой линии электропередачи, с определением периода ее переключения.

7. В программном пакете MATLAB *Simulink* была разработана имитационная модель линии электропередачи постоянного тока, учитывающая изменение температуры проводов линии в динамике их переключения. На основании полученных путем моделирования временных зависимостей подтверждены результаты полученные аналитически. Согласно полученным данным коэффициент запаса по мощности трехпроводной линии постоянного тока в составе электротехнического комплекса работающей в режиме повторно-кратковременной перегрузки проводов по току больше коэффициента запаса по мощности линии переменного тока на 14%.

8. Разработанный метод оценки повышения передаваемой активной мощности был апробирован на примере распределительной сети угольной шахты «Воргашорская». Установлено, что при переводе ее на постоянный ток, передаваемая активная мощность по критерию запаса по напряжению увеличивается в 2,23 раза, что больше на 57%, чем при совместном использовании УПК и УПОК.

Список литературы

1. Распоряжение от 28 августа 2003 г. N 1234-р Энергетическая стратегия России на период до 2020 года. Москва: Минэнерго, 2013.
2. Аналитический доклад: «Электроэнергетика России: проблемы выбора модели развития». Москва, 2014.
3. Рыжов Ю.П. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения. 1st изд.М.: ЗАО “Издательский дом МЭН,” 2007. С. 19-24
4. Бюро О.П.-сметное. Нормативные документы по воздушным линиях электропередач [Электронный ресурс]. 2015. URL: http://psb-energo.ru/publ/konsultacii_i_razjasnenija/ehnergetika/vozdushnye_linii_ehlektrperedachi/29-1-0-600 (дата обращения: 15.03.2017).
5. ФСК ЕЭС. История отрасли [Электронный ресурс] // История отрасли. 2007. URL: http://www.fsk-ees.ru/about/history_industry/ (дата обращения: 14.03.2017).
6. Darji K., Bhavsar F.M. Series voltage injection strategy for reactive power compensation of HVDC rectifier station // 2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES). IEEE, 2016. P. 1–4.
7. Garg R.K., Ray S., Gupta N. Reactive power compensation and power factor improvement using fast active switching technique // 2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES). IEEE, 2016. P. 1–5.
8. Chen H., Prasai A., Divan D. A Modular Isolated Topology for Instantaneous Reactive Power Compensation // IEEE Trans. Power Electron. 2017. P. 1–1.
9. Brusilowicz B., Szafran J., Wisniewski G. Reactive power compensation of

- nonlinear load // 13th International Conference on Development in Power System Protection 2016 (DPSP). Institution of Engineering and Technology, 2016. P. 6.-6 .
10. Ertao L. et al. An Improved Transformer Winding Tap Injection DSTATCOM Topology for Medium-Voltage Reactive Power Compensation // IEEE Trans. Power Electron. 2017. P. 1–1.
 11. Salgado-Herrera N.M. et al. Reactive power compensation through active back to back converter in type-4 wind turbine // 2016 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC). IEEE, 2016. P. 1–6.
 12. Александров Г.Н. Режимы работы воздушных линий электропередачи. 1-ое изд./ изд. Меркурьев Г.В. СПб: НОУ “Центр подготовки кадров энергетики,” 2006. 35-37 С.
 13. Вуколов В.Ю. Повышение эффективности систем передачи и потребителя электрической энергии. Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н. 2012. С. 6–8.
 14. Ефременко В.М., Белявский Р.В., Пономарев Н.В. Выбор оптимальных способов компенсации реактивной мощности в электрических сетях промышленных предприятий // Электротехнические комплексы и системы. 2011. Том 55, № 5. С. 81–86.
 15. Васин А.Е. Компенсация падения напряжения в распределительных сетях напряжением 6-10 кВ // Электро. 2007. Том 41, № 6. С. 34–35.
 16. Kopsidas K., Rowland S.M. Evaluation of potentially effective ways for increasing power capacity of existing overhead lines // 2009 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply. IEEE, 2009. P. 1–7.

17. Kruschel W. et al. Power electronic voltage regulator for increasing the distributed generation capacity in low voltage networks // 2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE). IEEE, 2013. P. 1–10.
18. Carrasco M. et al. Low frequency HVac transmission to increase power transfer capacity // 2014 IEEE PES T&D Conference and Exposition. IEEE, 2014. P. 1–5.
19. Шклярский Я.Э., Соловьев С.В., Барданов А.И. Обзор способов электрификации районов со слаборазвитой электроэнергетической инфраструктурой // Сборник трудов Международной научно-технической конференции “Инновации и перспективы развития горного и электромеханики IPDME - 2017 машиностроения.” 2017. С. 2015–2019.
20. Татаров Е.И. Электроэнергетика (Часть 2) комплекс учебно-методических материалов. 1st изд. Нижний Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2015. С. 10-14
21. Карпов Ю.С. Повышение пропускной способности межсистемных связей ЕЭС России: путь к выходу из дефицита // Вестник Университета. 2013. Том 23. С. 23–27.
22. ГОСТ 29322-2014 Напряжения стандартные. ОАО “ВНИИС,” 2014. С. 29322.
23. Мирошник А.А. Уточненные алгоритмы расчета потерь электроэнергии в сетях 0,38 кВ в реальном времени // Probl. Energ. Reg. 2010. Том 13, № 2. С. 35–42.
24. Прибытков Ю.Б., Зенина Е.Г. Анализ увеличения пропускной способности линий сверхвысокого напряжения // Техно-технологические инновации. 2013. Том 8, № 1. С. 112–116.

25. Постолатий В.М. и др.. Повышение пропускной способности и управляемости электропередач переменного тока // Проблемы региональной энергетики. 2008. Том 8, № 3. С. 86–103.
26. Цыганенко Б.В. Перспективы перевода распределительных сетей Украины на номинальное напряжение 20 кВ // Наукові праці ВНТУ. 2016. Том 22, № 1. С. 1–4.
27. Администрация СПб. Выбор способа прокладки КЛ 6-110 кВ в условиях плотной городской застройки [Электронный ресурс]. URL: <https://gov.spb.ru/static/writable/ckeditor/uploads/2015/12/28/2.Вопрос.pdf> (дата обращения: 24.04.2017).
28. Бигун А.Я. et al. Оценка экономической эффективности мероприятий по увеличению пропускной способности воздушных линий электропередач // VI Всероссийская научно-техническая конференция “Россия Молодая”, ОГТУ. 2015. С. 1–4.
29. Богданов Е.П., Рикконен С.В., Федянин А.Л. Повышение энергоэффективности распределительных сетей промышленных предприятий и объектов ЖКХ // Науковедение. 2013. Том 14, № 1. С. 1–8.
30. Song Y.-H., John A.T. Flexible Ac Transmission Systems (Facts) // IET Digital Library. London: Institution of Electrical Engineers, 1999. Vol. 1, № 1. 73-85 p.
31. Кузьмин С.В. Принцип построения и математическое моделирование статического компенсатора реактивной мощности в тяговой сети переменного тока // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2011. Том 3.
32. ФСК ЕЭС. Пграмма «Создание в единой энергосистеме (ЕЭС) России гибких (управляемых) систем электропередачи переменного тока и

устройств регулирования напряжения» [Электронный ресурс]. С. 44–50.
URL:

<https://www.google.ru/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwigpqrAkuXTAhUGkCwKHcz1BQ8QFggnMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.fsk-ees.ru%2Fmedia%2FFile%2Fevolution%2FPril5.doc&usg=AFQjCNGMYkQs-yiZ5FaHFodqbcvnpnS6Tig&sig2=EOXdy5AI4N6VL0LRT> (дата обращения: 01.02.2017).

33. Коломойцев К.Б. Регулируемые вольтдобавочные устройства // Электрик. 2005. № 7. С. 18–19.
34. Герасимов С.Е. Регулирование напряжения в распределительных сетях. Учебное пособие. 1-ое изд. СПб: Центр подготовки кадров СЗФ АО “ТВЦ Энергетики,” 1998. С. 115-120
35. Алексеев О.П. Электрические сети и системы. 1st изд. М.: Энергосамиздат, 1994. С. 45-50
36. Глазунов А.А. Электрические сети и системы. 4-ое изд. М.: Госатомиздат., 1960.
37. Игнашкин А.И. Применение установок продольной емкостной компенсации в распределительных сетях промышленных предприятий с резкопеременной нагрузкой. Диссертация на соискание звания к.т.н. Ленинград, 1984. С. 243
38. Шклярский Я.Э. Методы и средства повышения эффективности управления потоками реактивной мощности электротехнических комплексов горнодобывающих предприятий: Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Санкт-Петербургский государственный горный институт им. Г.В. Плеханова (технический университет), 2004. 327 с.

39. Bakas P. et al. Hybrid topologies for series and shunt compensation of the line-commutated converter // 2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia). IEEE, 2016. P. 3030–3035.
40. Furtado P.C. de S. et al. A comparison of two-phase three-wire shunt compensation strategies // 2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC). IEEE, 2015. P. 1–6.
41. Kowalak R. et al. Influence of shunt compensation with SVC devices on resonance risk in power systems // 2015 International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation (ISNCC). IEEE, 2015. P. 1–5.
42. Кувшинов А.А., Тараканов В.П. Поперечная емкостная компенсация реактивной мощности линий распределительных сетей среднего напряжения // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2012. № 2. С. 28–33.
43. Марикин А.Н., Мирощенко В.А. Адаптивное устройство поперечной компенсации реактивной мощности в тяговом электроснабжении переменного тока // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2014. Том 38, № 1. Р. 16–21.
44. Дулепов Д.Е., Тюндина Т.Е. Расчет несимметрии напряжений СЭС // Вестник НГИЭИ. 2015. Том 47, № 2. С. 35–42.
45. Кулешов В.Е. Применение регулируемых устройств поперечной компенсации реактивной мощности // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2011. Том 1, № 6. С. 177–180.
46. Реактивная мощность в энергосистеме. Компенсация реактивной мощности. [Электронный ресурс] // Ставропольский государственный

- аграрный университет. 2012. С. 6. URL: www.stgau.ru/company/personal/user/7066/files/lib/.../Лекция_16.doc (дата обращения: 27.03.2017).
47. Герман Л.А., Серебряков А.С. Силовой тиристорный ключ для дискретно регулируемой установки поперечной компенсации реактивной мощности // Вестник НГИЭИ. 2010. Том 2, № 1. С. 35–40.
 48. Кабышев А.В. Компенсация реактивной мощности в электроустановках промышленных предприятий. Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2012. С. 145
 49. Смолвик С.В., Халилович Ф.Х. Выбор оптимальных длин и сечений, рабочего напряжения передаваемой мощности в сетях 0.38-110 кВ // Труды КНЦ РАН. 2011. Том 26, № 1.
 50. Зотин О.Т. В преддверии возрождения постоянного тока. DC Rematch Upcoming Энергосовет // Энергосовет. 2001. Том 5, № 2.
 51. Шклярский Я.Э., Соловьев С.В. Сравнение эффективности передачи электроэнергии на примере ЛЭП постоянного и переменного тока // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. Том 48, № 6. С. 170–175.
 52. Шклярский Я.Э., Соловьев С.В. Особенности микросети на постоянном токе с использованием ветрогенераторов // Электротехнические комплексы и системы управления. 2015. № 3. С. 50–54.
 53. Шклярский Я.Э., Соловьев С.В. Анализ экономической эффективности ЛЭП постоянного тока в сравнении с переменным током // Научная дискуссия Вопросы технических наук. 2016. № 5. С. 90–96.
 54. Bathurst G., Hwang G., Tejwani L. MVDC - The New Technology for Distribution Networks // 11th IET International Conference on AC and DC

- Power Transmission. Institution of Engineering and Technology, 2015. P. 027 (5 .)-027 (5 .).
55. Kimbark E.W. Direct current trasmission. Portland, Oregon: John Wiley & Sons, 1971. 391-393 p.
 56. Häusler M., G. S., Fitterer G. Converting AC power lines to DC for higher transmission ratings [Electronic resource] // ABB wibsite. URL: [https://library.e.abb.com/public/.../04-11 ENG 9703....%0A](https://library.e.abb.com/public/.../04-11_ENG_9703....%0A) (accessed: 10.03.2017).
 57. Li Y., Junyent-Ferre A., Rodriguez-Bernuz J.-M. A Three-Phase Active Rectifier Topology for Bipolar DC Distribution // IEEE Trans. Power Electron. 2017. P. 1–1.
 58. Mackay L. et al. Optimal power flow in bipolar DC distribution grids with asymmetric loading // 2016 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON). IEEE, 2016. P. 1–6.
 59. Sheshyekani K. et al. Decentralised voltage balancing in bipolar dc microgrids equipped with trans-z-source interlinking converter // IET Renew. Power Gener. 2016. Tom 10, № 5. P. 703–712.
 60. Gu Y., Li W., He X. Analysis and Control of Bipolar LVDC Grid With DC Symmetrical Component Method // IEEE Trans. Power Syst. 2016. Vol. 31, № 1. P. 685–694.
 61. Li W. et al. Influence of Deep Earth Resistivity on HVDC Ground-Return Currents Distribution // IEEE Trans. Power Deliv. 2016. P. 1–1.
 62. Pan Z. et al. HVDC Ground Return Current Modeling in AC Systems Considering Mutual Resistances // IEEE Trans. Power Deliv. 2016. Vol. 31, № 1. P. 165–173.
 63. Sheng Wang et al. Influence of HVDC ground electrode current on AC

- transmission system and development of restraining device // 2008 Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies. IEEE, 2008. P. 2151–2156.
64. De Boeck S. et al. Configurations and earthing of HVDC grids // 2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting. IEEE, 2013. P. 1–5.
 65. Ma J., Liu L., Sun S. Calculation of earth surface potential distribution of HVDC due to finite element and multi-layer soil // 2011 International Conference on Electrical and Control Engineering. IEEE, 2011. P. 589–592.
 66. Herman S.L. Direct Current Fundamentals. 8th изд. Pittsburg, Texas: DELMAR, Cengage learning, 2012. 80-90 p.
 67. Arrillaga. High Voltage Direct Current Transmission. Institution of Engineering and Technology, 1998. 50-62 p.
 68. Anwar A., Pota H.R. Optimum capacity allocation of DG units based on unbalanced three-phase optimal power flow // 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting. IEEE, 2012. P. 1–8.
 69. Ng C.H. et al. A Multilevel Modular Converter for a Large, Light Weight Wind Turbine Generator // IEEE Trans. Power Electron. 2008. Vol. 23, № 3. P. 1062–1074.
 70. Muttaqi K.M. et al. An Algebraic Approach for Determination of DG Parameters to Support Voltage Profiles in Radial Distribution Networks // IEEE Trans. Smart Grid. 2014. Vol. 5, № 3. P. 1351–1360.
 71. Peng Q., Low S.H. Distributed algorithm for optimal power flow on a radial network // 53rd IEEE Conference on Decision and Control. IEEE, 2014. P. 167–172.
 72. Yong-jun Z., Qin-hao L., Xu C. Reactive power optimization oriented control using optimal reactive power supply for radial network // 2014 IEEE

REGION 10 SYMPOSIUM. IEEE, 2014. P. 492–495.

73. Ruben B. et al. Meshing radial networks at 11kV // 2011 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies. IEEE, 2011. P. 1–8.
74. Жарков Ю.И., Фигурнов Е.П. Проблемы организации защиты тяговой сети постоянного тока от коротких замыканий при повышенных токовых нагрузках // Электропоставания. 2014. № 7. С. 28–31.
75. МатикЭлектро. Гармоники тока и напряжения в электросетях [Электронный ресурс]. URL: <http://www.matic.ru/clients/articles/harmonics-voltage-and-current-in-electrical-networks/> (дата обращения: 01.02.2017).
76. Beres R.N. et al. A Review of Passive Power Filters for Three-Phase Grid-Connected Voltage-Source Converters // IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron. 2016. Vol. 4, № 1. P. 54–69.
77. Nag S.S., Mishra S., Joshi A. A Passive Filter Building Block for Input or Output Current Ripple Cancellation in a Power Converter // IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron. 2016. Vol. 4, № 2. P. 564–575.
78. Jayalath S., Ongayo D., Hanif M. Modelling powder core inductors for passive filters in inverters using finite element analysis // Electron. Lett. 2017. Vol. 53, № 3. P. 179–181.
79. Li X., Xu W., Ding T. Damped High Passive Filter—A New Filtering Scheme for Multipulse Rectifier Systems // IEEE Trans. Power Deliv. 2017. Vol. 32, № 1. P. 117–124.
80. Motta L., Faundes N. Active / passive harmonic filters: Applications, challenges & trends // 2016 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP). IEEE, 2016. P. 657–662.

81. Zhiding Wu, Aldeen M. Optimal design method of passive LCL filters for grid-connected inverters // 2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). IEEE, 2016. P. 237–242.
82. Liu H. et al. A Power Quality Disturbance Classification Method Based on Park Transform and Clarke Transform Analysis // 2008 3rd International Conference on Innovative Computing Information and Control. IEEE, 2008. P. 524–524.
83. Silapunt R., Torrungrueng D. A Novel Analysis of Two-Port Networks in the System of Conjugately Characteristic-Impedance Transmission Lines (CCITLs) // 2005 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings. IEEE. Vol. 3. P. 1–4.
84. Железко Ю.С. Для поддержания напряжения на допустимом уровне применяются устройства компенсации потерь напряжения. Руководство для практических расчетов. М.: ЭНАС, 2009. С. 198-218
85. Кафедра «Электроэнергетика электроснабжение и силовая электроника». Конспект лекций по дисциплине «Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения». Нижний Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2013. С. 16–19.
86. Шклярский А.Я. Повышение качества электроэнергии в промышленных распределительных сетях предприятий нефтедобычи. 2013. С. 132
87. Шклярский Я.Э., Соловьев С.В., Барданов А.И. Перевод трехпроводной линии электропередач среднего напряжения на постоянный ток // Известия ТулГУ. 2017. Том 41, № 5. С. 353–361.
88. Emanuel A.E. Power definition and the physical mechanism of power flow. Jhohn Wiley&Sons, Ltd, 2010. 254 p.
89. Fuchs E., Masoum M.A. Power Quality in Power Systems and Electrical

- Machines. Elsevier, 2008. 637 p.
90. Arrillaga J. High Voltage Direct Current Transmission. London, UK: IET power and energy series, 2008. 296 p.
 91. Pirog S. Energoelectronika. Krakow, Poland: AGH, 2006. 1012 p.
 92. Arrillaga J., Liu Y.H. Flexible Power Transitions. The HVDC options. London, UK: Jhohn Wiley&Sons, Ltd, 2007. 362 p.
 93. Chua L., Desoer C. Linear and nonlinear circuits. Califirnia, Berkleley: McGraw Hill, 1987. 839 p.
 94. СССР К.С.И.М. ГОСТ 23286-78, кабели, провода и шнуры нормы толщин изоляции, оболочек и испытаний напряжением. М., 1978.
 95. Morgan D.V., Parkman N.K. Overshoot Electrical degradation and breakdown in polymers. The Institution of Engineering and Technology, 2008. 600 p.
 96. Monah N., Underland T., Robbins W. Power electronics, Converters Applications and Design. Jhohn Wiley&Sons, Ltd, 2003. 792 p.
 97. Yenckek M., Cole G., Edwards J. Thermal Modeling of Portable Power Cables - Report of Investigations. 1993. 19 p.
 98. Alenitsyn A. et al. Concise Handbook of Mathematics and Physics. CRC Press, 1997. 331-332 p.
 99. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: Учебник. 10-ое изд.М.: Гардарики, 2002. 638 с.

Приложение А

File: EL 4

15.10.2016 г.

Центральная подземная подстанция гор.-140-1

тел.7-64

УТВЕРЖДАЮ
Начальник АС и РЗО
_____ Килин Н.К.

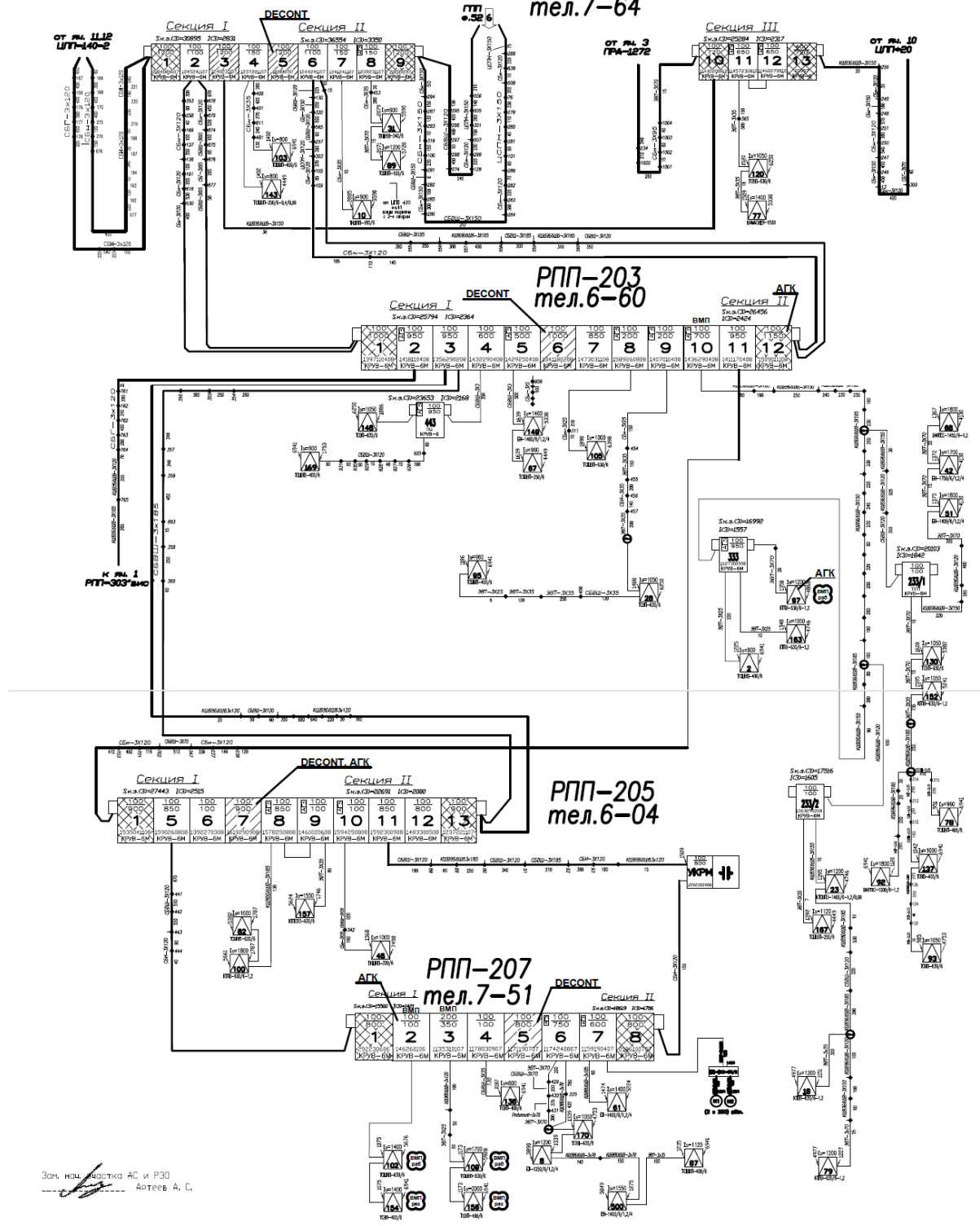


Рисунок А.1.1 – Принципиальная однолинейная схема электроснабжения центральной подземной подстанции гор.-140-1

Центральная подземная подстанция гор.-140-2
тел. 6-84

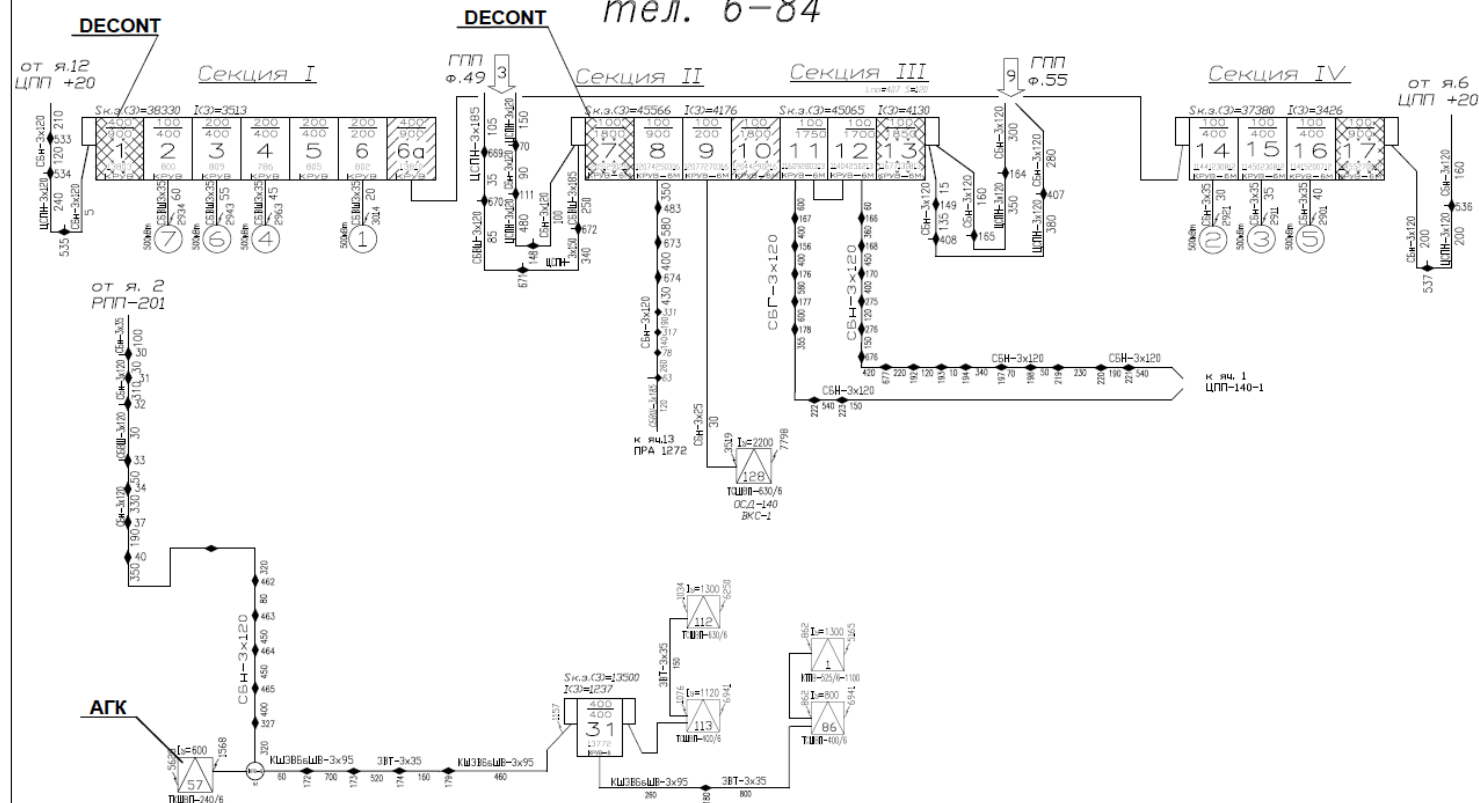


Рисунок А.1.2 – Принципиальная однолинейная схема электроснабжения центральной подземной подстанции гор.-140-2

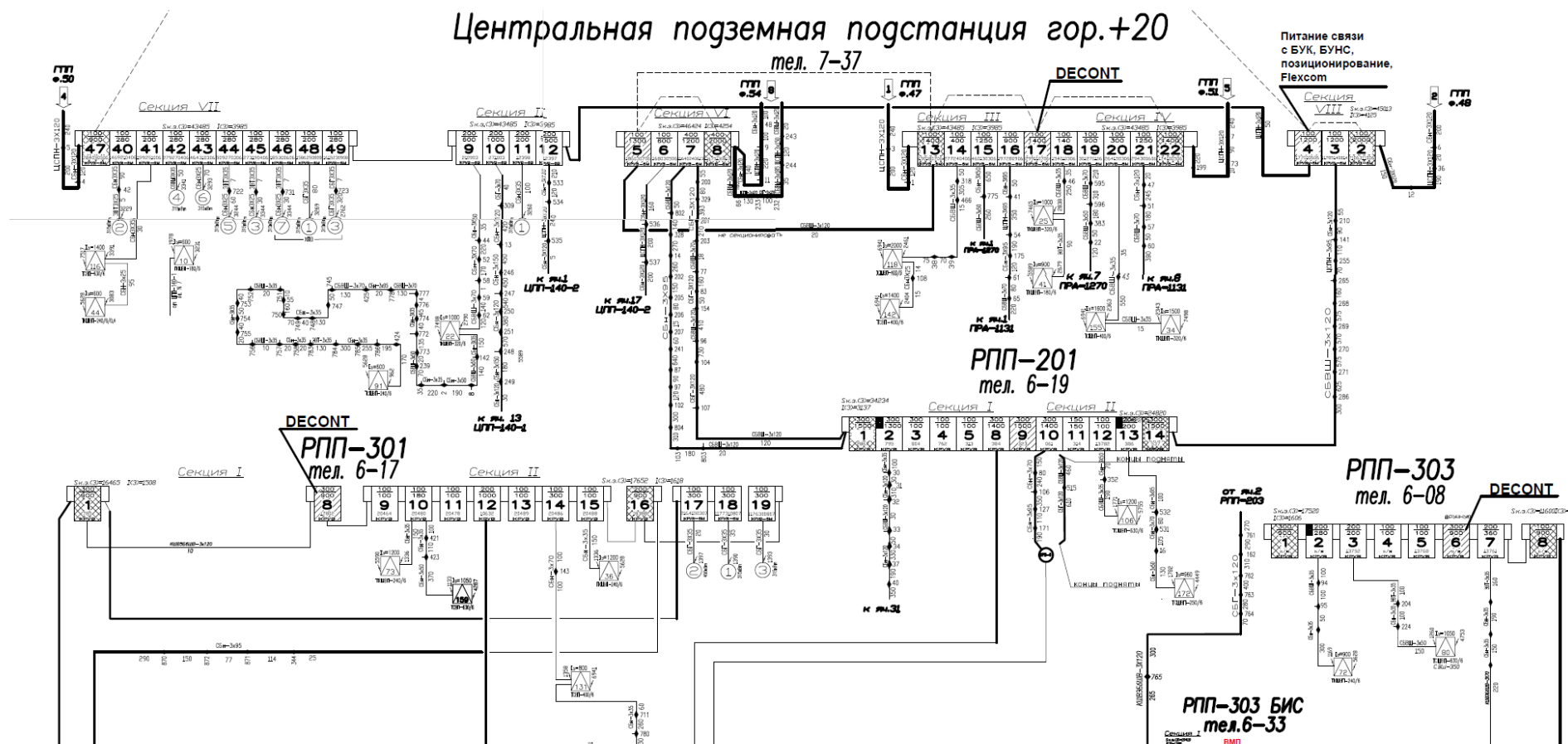


Рисунок А.1.3 – Принципиальная однолинейная схема электроснабжения центральной подземной подстанции гор.+20