

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ  
КАЗАХСТАН

САТБАЕВ УНИВЕРСИТЕТИ

Институт Промышленной автоматизации и цифровизации

Кафедра Энергетика

Есімбек Батыр Талғатулы

«Разработка и исследование энергосберегающей технологии передачи  
электроэнергии на дальние расстояния»

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Специальность 6M071800 – «Электроэнергетика»

Алматы 2020

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ  
КАЗАХСТАН

САТБАЕВ УНИВЕРСИТЕТИ

Институт Промышленной Автоматизации и Цифровизации

УДК 665.622.43.046.6-52 (043)

На правах рукописи

Есімбек Батыр Талғатулы

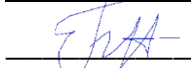
МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

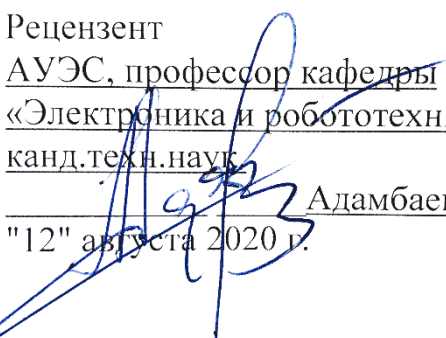
На соискание академической степени магистра

Название диссертации «Разработка и исследование  
энергосберегающей технологии передачи  
электроэнергии на дальние расстояния»


Направление подготовки 6M071800 – «Электроэнергетика»

Научный руководитель  
PhD, ассистент-профессор


 Балгаев Н.Е.  
"10" августа 2020 г.

Рецензент  
АУЭС, профессор кафедры  
«Электроника и робототехника»,  
канд.техн.наук  
 Адамбаев М.Ж.  
"12" августа 2020 г.

Нормоконтроль

 Бердибеков А.О.  
"11" августа 2020 г.

**ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ**

Заведующий кафедрой «Энергетика»  
 Сарсенбаев Е.А.  
"12" августа 2020 г.

Алматы 2020

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ  
КАЗАХСТАН

САТБАЕВ УНИВЕРСИТЕТИ

Институт Промышленной Автоматизации и Цифровизации  
Кафедра Энергетика

Специальность 6М071800– «Электроэнергетика»

**УТВЕРЖДАЮ**

Заведующий кафедрой «Энергетика»

 Сарсенбаев Е.А.

"13" января 2020 г.

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение магистерской диссертации**

Магистранту Есимбеку Батыру Талгатұлы

Тема: «Разработка и исследование энергосберегающей технологии передачи электроэнергии на дальние расстояния».

Утверждена приказом проректора Университета №1208–м от "30" октября 2018 г.

Срок сдачи законченной диссертации: "10" июня 2020 г.

Исходные данные к магистерской диссертации: *Мощность нагрузки - 1000МВт, длина линии - 1069 км*

Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов:

а) Анализ состояния передачи электрической энергии на дальние расстояния;

б) Расчет параметров ЛЭП на переменном и постоянном токе;

в) Моделирование и исследование передачи электроэнергии на дальние расстояния.

Рекомендуемая основная литература:

1. В.И. Идельчик Электрические сети и системы. М.: Энергоатомиздат, 1989.
2. Проектирование электрических сетей : учеб. пособие / С.С. Ананичева, Е.Н. Котова.— Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2017. — 164 с.





## ГРАФИК

подготовки магистерской диссертации

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Анализ состояния передачи электрической энергии на дальние расстояния	31.01.2019г.	Выполнено
Расчет параметров ЛЭП на переменном и постоянном токе	31.08.2019г.	Выполнено
Моделирование и исследование передачи электроэнергии на дальние расстояния	31.03.2020г.	Выполнено

### Подписи

консультантов и нормоконтролера на законченную магистерскую диссертацию с указанием относящихся к ним разделов диссертации

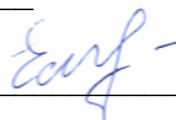
Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Анализ состояния передачи электрической энергии на дальние расстояния	Н.Е. Балгаев, PhD	10.08.2020г.	
Расчет параметров ЛЭП на переменном и постоянном токе	Н.Е. Балгаев, PhD	10.08.2020г.	
Моделирование и исследование передачи электроэнергии на дальние расстояния	Н.Е. Балгаев, PhD	10.08.2020г.	
Нормоконтролер	Бердибеков А.О.	11.08.2020г.	

Научный руководитель \_\_\_\_\_



Балгаев Н.Е.

Задание принял к исполнению обучающийся \_\_\_\_\_



Есімбек Б.Т.

Дата

"13" января 2020 г.

## АННОТАЦИЯ

В данной магистерской работе рассмотрены технологии передачи электрической энергии. Согласно многим исследованиям по потерям электрической энергии львиная доля потерь приходится именно потерям при передаче электрической энергии. Учитывая текущее состояние топливных запасов и других источников энергии, возрастанием потребностью человечества в электричестве - энергосбережение и минимизация потерь при передаче является актуальной темой. Для более конкретного исследования данного вопроса было выбрано одна из системообразующих сетей Республики Казахстан. Таким образом, объектом исследования в данной работе является линии электропередач на дальние расстояния. Для исследования режимов работ линии электропередач использовалась программная среда Matlab.

Ключевые слова: Линии электропередач, HVAC, HVDC, энергосбережение.

## ANNOTATION

In this master's work, technologies for the transmission of electrical energy are considered. According to many studies on losses of electrical energy, the bulk of losses is accounted for by losses in the transmission of electrical energy. Considering the current state of fuel reserves and other energy sources, the growing need of mankind for electricity - energy conservation and minimization of transmission losses is an urgent topic. For a more specific study of this issue, one of the backbone networks of the Republic of Kazakhstan was chosen. Thus, the object of research in this work is long-distance power lines. The Matlab software environment was used to study the operating modes of the power line.

Key words: Power lines, HVAC, HVDC, energy saving.

## АҢДАТПА

Аталған магистрлік жұмыста электр энергиясын тасымалдау технологиялары қарастырылды. Көптеген зерттеулерге сәйкес электр энергиясы шығынының басым бөлігі энергияны тасымалдау кезінде болатындығы анықталған. Жаңартылмайтын және басқа да энергия көздерінің қазіргі жағдайын, адамзаттың энергияға деген сұранысының өсуін ескере келсек, энергияны үнемдеу және шығынды азайту өзекті мәселелердің бірі болып тұр. Осы мәселені нақтырақ зерттеу мақсатымен Қазақстан Республикасының жүйе құраушы тораптарының бірі таңдалды. Осылайша, жұмыстың негізгі зерттеу объектісі - электр энергиясын алыс қашықтықтарға тарату желілері болып табылды. Электр беріліс желілерінің жұмыс режимдерін зерттеу үшін Matlab бағдарламалық ортасы қолданылды.

Түйін сөздер: Электр беріліс желілері, HVAC, HVDC, энергия үнемдеу.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение	6
1 Анализ состояния передачи электрической энергии на дальние расстояния	8
1.1 Электропередачи на постоянном токе (HVDC)	8
1.2 Электропередачи на постоянном токе (HVAC)	10
1.3 Полуволновая технология передачи электроэнергии	14
1.4 Резонансная однопроводная линия электропередачи	16
1.5 Сверхпроводящие кабельные линии	17
1.6 Сравнение основных характеристик линии электропередач	19
Выводы по главе	23
2 Расчет параметров ЛЭП на переменном и постоянном токе	24
2.1 Расчет напряжения и параметров ВЛ переменного тока	24
2.2 Расчет напряжения и параметров ВЛ постоянного тока	28
Выводы по главе	29
3 Моделирование и исследование передачи электроэнергии на дальние расстояния	30
3.1 Моделирование и исследование высоковольтной ЛЭП переменного тока	30
3.2 Моделирование и исследование высоковольтной ЛЭП постоянного тока	36
Выводы по главе	38
Заключение	39
Список использованной литературы	40

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** Во всем мире с каждым годом растет доля возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Это связано с тем что мировая общественность очень обеспокоена вопросами запасов ископаемого топлива и их влиянием на окружающую среду. Очень хороший потенциал ВИЭ также обуславливает всё больший интерес к ним. Однако, чтобы раскрыть весь потенциал ВИЭ необходимо использовать все подходящие местности нашей планеты. Развитые страны уже рассматривают такие варианты, планируется строительство солнечных электростанции в странах Северной Африки и Ближнего Востока для передачи энергии в Европу (DESERTEC, [1]). Однако, чтобы передавать большое количество электроэнергии необходимо использовать соответствующие технологии, которые будут:

- обеспечивать требуемый уровень пропускной способности;
- обеспечивать статическую и динамическую устойчивость режима электропередачи;
- обеспечивать высокий уровень бесперебойности и надежности;
- экономически целесообразны.

Поскольку вопрос передачи большого количества электрической энергии является на сегодняшний день актуальной, в данной работе исследуются существующие технологии передачи электроэнергии на дальние расстояния.

**Цель исследования.** Разработка модели и исследование режимов работы линий электропередач.

**Задачи исследования.** Рассмотреть разные виды электропередачи, провести сравнительный анализ по основным характеристикам и по критериям экономической эффективности, создать математическую модель эффективной технологии передачи электроэнергии, исследовать режимы работы ЛЭП.

**Объект исследования.** Линии электропередач на дальние расстояния

**Предмет исследования.** Разработка и исследование математической модели энергосберегающих линий электропередач.

**Методы исследования.** Теория электрических и магнитных цепей с применением программы Matlab.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

- результаты сравнения основных характеристик линий электропередач;
- расчетные параметры линий электропередач с учетом распределенности параметров;
- модели линий электропередач;

- результаты исследования режимов работы линий электропередач.

**Научная новизна:** Разработаны математические модели линий электропередач переменного и постоянного тока с учетом распределенности параметров электромагнитной цепи.

**Научная и практическая значимость результатов исследования.** Разработанные модели с учетом распределенности параметров электромагнитной цепи, позволяет на стадии проектирования линии электропередач исследовать их в статическом и динамическом режимах.

**Опубликованность результатов.** Результаты анализа состояния передачи электрической энергии на дальние расстояния доложены и обсуждены на международной конференции «Сатпаевские чтения 2019», «Инновационные технологии – ключ к успешному решению фундаментальных и прикладных задач в рудном и нефтегазовом секторах экономики РК»

**Структура и объем диссертации.** Диссертация структурирована следующим образом: обзорная информация о диссертации дано во введении, основная часть работы распределено в трех главах, далее следуют заключение, список использованной литературы состоящее из 31 источников. Работа выполнена на 41 страницах, содержит 18 рисунков и 5 таблиц.



## **1 Обзор технологиям электропередачи**

### **1.1 Обзор технологии высоковольтных линий электропередачи постоянного тока (HVDC)**

В качестве решения передачи большого количества мощности от ВИЭ и других источников энергии рассматриваются системы передачи высокого напряжения постоянного тока.

В ординарной системе высоковольтных линий постоянного тока мощность переменного тока берется из сети переменного тока, преобразуется в постоянный ток преобразовательной станцией и передается в удаленную точку по воздушной линии на суше или кабельной линией для подводной передачи. Электрическая энергия постоянного тока преобразуется обратно в переменный ток преобразовательной станцией и снова подключается к сети переменного тока [2].

Для передачи мощности до 500 МВт в высоковольтных линиях постоянного тока используются преобразователи с питанием от источника напряжения (VSC-HVDC), а для передачи большей мощности используются преобразователи с питанием от источника тока (CSC-HVDC). Можно выделить следующие виды этих технологий: монополярная, биполярная, триполярная. Которая показана на рис.1 [2]. На данный момент используются технологии монополярного и биполярного типа, а триполярная находится на стадии исследования. Монополярные системы распространены меньше из-за частых отключений, а во время передачи электроэнергии протекает обратный ток через заземляющий электрод что отрицательно влияет на окружающую среду. Для обеспечения более высокой надежности и передачи большей мощности чем в монополярной системе используется биполярная система. Также она более привлекательна из-за того, что, если одна линия по непредвиденным обстоятельствам неисправна, система может продолжить работу передавая примерно половину номинальной мощности по неповрежденной линии в монополярном режиме с использованием земли в качестве обратного проводника. Также биполярная система дополнительно может оснащена металлическим обратным проводником, но это экономически невыгодно. Важно отметить что биполярная система без заземления или с обратным проводником обходиться дешевле чем остальные системы [2].

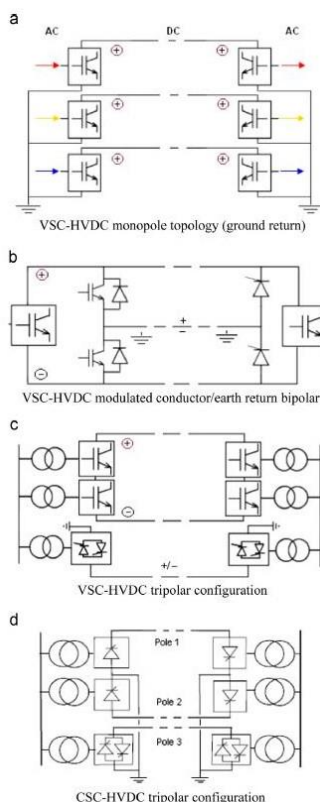
В высоковольтных линиях постоянного тока также используются линейно коммутируемые преобразователи (LCC-HVDC). В этих преобразователях тиристоры могут включаться только один раз за период и нуждаются в источниках переменного напряжения с обеих сторон линии постоянного тока и в реактивной мощности из-за фазового сдвига во время переключения. Из-за низкой частоты переключения полупроводников (50Гц), постоянный ток должен быть сглажен реакторами постоянного тока и фильтрами, а гармоники в сетях переменного тока должны быть уменьшены сетевыми фильтрами переменного тока с обеих сторон[7]. Вы сможете

увидеть эту технологию на рис.2 [7]. Взамен этих технологий можно использовать системы на преобразователях с питанием от источника напряжения (VSC) с самокоммутацией в которых применяются транзисторы с изолированным затвором (IGBT), которые просты в управлении. Из-за высокой частоты переключения полупроводников эти системы производят меньше гармоник, что дает возможность уменьшить число линейных фильтров. В итоге они более компактные и экономичные[8].

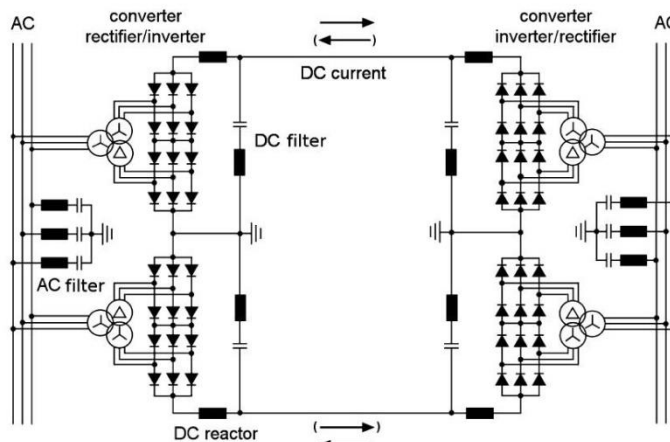
Технологический прорыв в области силовой электроники и автоматического управления дает возможность усовершенствовать технологий высоковольтных линий электропередач постоянного тока. В виде примера можно привести мульти терминальные высоковольтные линий электропередач постоянного тока (MTDC-HVDC). Применение этих технологий инспирировало проекты и исследования по соединению удаленных источников возобновляемой энергии. Основная задача этих технологий заключается в разработке соответствующих стратегий управления и распределения мощности в соответствии требованиями каждого терминала. Однако, с увеличением количества терминалов и диверсификацией взаимосвязанных систем переменного тока стратегия управления системой постоянного тока становится более сложной [3].

В целом выделяют три вида мульти терминальных высоковольтных линий электропередач постоянного тока: система с радиальной сетью, системы с кольцевой сетью и системы с ячеистой сетью.

В радиальной сети напряжение в сети стабилизируется путем излучения, в качестве источника излучения используют станцию баланса мощностей. Эта станция контролирует мощность каждой ветви излучения[3,4]. В системе кольцевой сетью мощность постоянного тока регулируется на одном терминале, которая влияет на напряжение постоянного тока других станций в системе. Изменение напряжения и мощности одной станции независимо от системы является трудным. Таким образом система с кольцевой сетью обладает высокой стабильностью и надежностью, однако это чревато с трудностями в управлении напряжением[5]. Системы с ячеистой сетью как и системы с кольцевой сетью обеспечивают высокую стабильность и высокое значение передаваемой мощности. На данный момент проведено очень мало исследований по ячеистым системам и нет соответствующего практического проектирования. Больше информации по ячеистым системам вы можете получить в [6].



**Рисунок 1 – Монополярные, биполярные, триполярные схемы высоковольтных линий электропередачи постоянного тока [2]**



**Рисунок 2 – Биполярная схема высоковольтной линии электропередачи постоянного тока [7]**

## 1.2 Технологии высоковольтных линии электропередач переменного тока

подавляющее большинство линий электропередачи представляют собой линии переменного тока из-за их способности к надежному и эффективному преобразованию номинального напряжения в более высокие или более низкие уровни и относительной простоте конструкции

распределительного устройства. Распределительные сети обычно работают ниже 100 кВ, в то время как основная мощность передается при более высоких напряжениях. Линии, работающие при разных напряжениях, соединены через трансформаторы, которые работают с высокой эффективностью. Традиционно, линии переменного тока не предусматривают контроль потока энергии. Технически использование линий передачи переменного тока ограничено статическими и динамическими системными явлениями, такими как температурные пределы, стабильность напряжения или стабильность переходного процесса. Помимо использования сложных схем проводников, эти ограничения традиционно устранялись путем установки постоянных или механически переключаемых (шунтирующих или последовательных) конденсаторов, реакторов и синхронных конденсаторов, а также внедрением более совершенных технологий, которые приведены ниже [9,10].

Одним из наиболее простых устройств управления потоками мощностей по линиям электропередачи являются фазоворотные устройства (ФПУ), которые по конструкции очень схожи с трансформаторами. В этих устройствах автоматически меняется электромагнитное поле, вследствие чего изменяется фазы выходного напряжения относительно входного. Таким образом суммарный угол сдвига между векторами напряжения по концам линии электропередачи с таким устройством изменяется, а вместе с ним изменяется передаваемая активная мощность [11].

ФПУ бывают разных форм. Их можно классифицировать по следующим характеристикам:

- Прямые ФПУ основаны на одном трехфазном ядре. Сдвиг фазы получается путем соединения обмоток соответствующим образом.

- Косвенные ФПУ основаны на конструкции с 2 отдельными трансформаторами; один переменный импульсный возбудитель для регулирования амплитуды квадратурного напряжения и один последовательный трансформатор для подачи квадратурного напряжения в нужную фазу.

- Асимметричные ФПУ создают выходное напряжение с измененным фазовым углом и амплитудой по сравнению с входным напряжением.

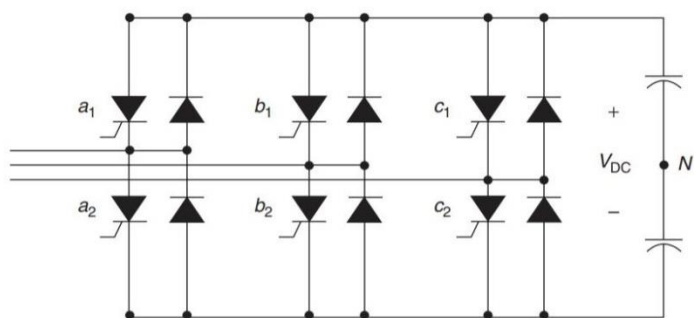
- Симметричные ФПУ создают выходное напряжение с измененным фазовым углом по сравнению с входным напряжением, но с той же амплитудой

Больше информации по ФПУ вы можете получить в [11,12].

Одним из вариантов решения проблем, которые возникают из-за увеличения потребления и усложнения электроэнергетических систем является гибкая система передачи переменного тока (FACTS). Они дают возможность быстрого динамического контроля активной и реактивной мощностью, которые способствуют адаптации сетей переменного тока к

изменяющимся условиям, вызванным непредвиденными обстоятельствами и изменениями нагрузки. Гибкая система передачи переменного тока повышает производительность системы переменного тока, обеспечивая скорость и гибкость в управлении величиной напряжения, реактивным сопротивлением линии и фазовым углом линий электропередачи. Они включают в себя все управляемые компенсационные устройства на основе силовой электроники[9,10]. Которые приведены ниже.

Преобразователи с питанием от источника напряжения (VSC). Основным составляющим современного устройства гибких систем передачи переменного тока (FACTS) является VSC. VSC состоит из источника напряжения (аккумулятор или конденсатор) для обеспечения почти постоянного напряжения постоянного тока. Ввод или поглощение мощности контролируется направлением постоянного тока в преобразователь или из него. Большинство контроллеров FACTS используют трехфазный двухполупериодный VSC для взаимодействия между сторонами постоянного и переменного тока преобразователя[13]. Типичный трехфазный преобразователь показан на рис. 3 [13].



**Рисунок 3 – Трехфазный двухполупериодный преобразователь [13]**

Контроллеры гибких систем передачи переменного тока на основе VSC:

Статический синхронный компенсатор (STATCOM)

Статический синхронный последовательный компенсатор (SSSC)  
(последовательно соединенный)

Межлинейные регуляторы потока мощности (IPFC)

Объединенные регуляторы потока мощности (UPFC)  
(комбинированная серия шунтов)

Статический синхронный компенсатор (STATCOM) - это устройство FACTS с шунтовым подключением, которое используется в основном для управления реактивной мощностью. STATCOM имеет два возможных стационарных режима работы: индуктивный (запаздывающий) и емкостной (опережающий). STATCOM были широко приняты для улучшения работы энергосистемы. STATCOM состоит из одного VSC и связанного с ним

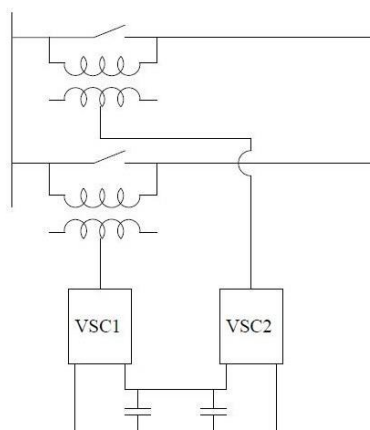
шунтирующего трансформатора. Функция STATCOM аналогична с работой вращающегося синхронного конденсатора или статического компенсатора VAR (SVC) и обычно используется для обеспечения компенсации реактивной мощности для поддержки напряжения [15].

Статический синхронный последовательный компенсатор (SSSC) - обеспечивает емкостную или индуктивную компенсацию независимо от тока линии. Устройства, которые используются в SSSC схожи с устройствами STATCOM. Однако SSSC подключается в линию через последовательный соединительный трансформатор, в отличие от STATCOM который подключается через шунтирующий трансформатор. Последовательный трансформатор используется для подачи независимо контролируемого напряжения в квадратуре с током линии с целью увеличения или уменьшения общего падения реактивного напряжения на линии и, таким образом, управления передаваемой мощностью. По сути, SSSC может рассматриваться как контролируемый эффективный импеданс линии [13,14].

Объединенные регуляторы потока мощности (UPFC) - самое универсальное устройство FACTS. Он состоит из комбинации шунта и последовательных ответвлений (STATCOM и SSSC), соединенных через конденсатор постоянного тока. Последовательно соединенный инвертор вводит напряжение с регулируемой величиной и фазовым углом последовательно с линией передачи, тем самым обеспечивая активную и реактивную мощность для линии передачи. Инвертор с шунтовым подключением обеспечивает активную мощность, потребляемую последовательной ветвью и потери, и может независимо обеспечивать реактивную компенсацию системы. Поскольку UPFC является комбинацией как STATCOM, так и SSSC, его можно использовать для одной или обеих функций управления этими устройствами [14].

Межлинейные регуляторы потока мощности (IPFC) - относится к конфигурации двух или более последовательно соединенных преобразователей, совместно использующих общую шину постоянного тока. IPFC – обеспечивает возможность управляемой компенсации реактивной мощности каждой отдельной линии и возможность прямой передачи или обмена активной мощностью между компенсированными линиями. Это возможно путем соединения - последовательно преобразователей VSC в отдельных линиях на стороне постоянного тока и всех конденсаторов отдельных линий постоянного тока параллельно [15]. Межлинейные регуляторы потока мощности (IPFC) с двумя преобразователями показан на рис.4 [9].

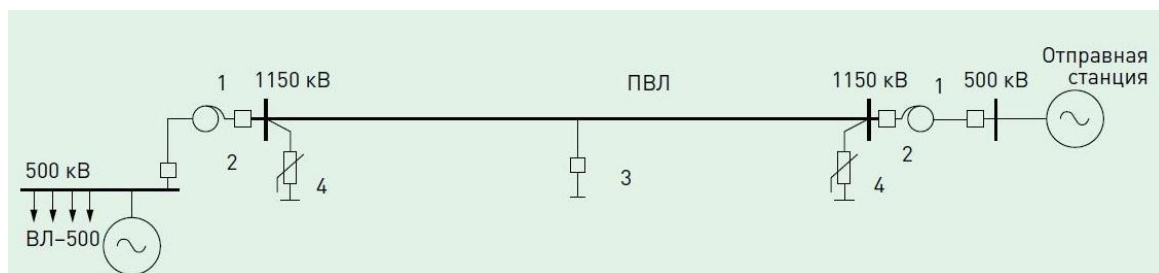
Одним из видов FACTS являются устройства на основе регуляторов с переменным сопротивлением. К ним относятся: статические компенсаторы реактивной мощности (SVC), конденсатор или компенсатор с тиристорным управлением (TCSC), тиристорно-управляемый фазоповоротное устройство (TCPST). Подробную информацию об этих устройствах вы можете получить в [9].



**Рисунок 4 – Межлинейные регуляторы потока мощности (PFC) с двумя преобразователями [9]**

### **1.3 Полуволновая технология передачи электроэнергии**

Альтернативным способом передачи электроэнергии на дальние расстояния является полуволновая передача электроэнергии. Полуволновая передача электроэнергии обладает существенными преимуществами перед обычными линиями переменного тока. Они не имеют ограничений на передаваемую мощность по условию устойчивости, так как их реактивное сопротивление равно нулю. Также эти линии сбалансированы по реактивной мощности, и их устойчивая работа не требует установки компенсирующих устройств. Физическая длина полуволновой линии зависит от частоты промышленного тока и составляет ~3000 км при частоте 50 Гц. Если длина конкретной линии отличается от полуволновой, то придать ей свойства полуволны можно включением в концевых пунктах устройств реактивной мощности, обеспечивающих искусственную настройку на полуволну, в случае длины линии меньше полуволновой, и компенсацию до полуволны при длине линии больше полуволны. Практически работа линии в полуволновом режиме обеспечивается без применения устройств реактивной мощности в диапазоне длин 2700–3300 км, поскольку при длинах линии меньше полуволновой следует учитывать настраивающий эффект концевых автотрансформаторов. Также можно не устанавливать устройства компенсации при длинах, превышающих полуволновую в пределах 300 км. Основными структурными элементами полуволновой электрической передачи (ПЭП) являются полуволновая линия и концевые подстанции, автотрансформаторы которые осуществляют связь линии с примыкающими системами [16,17].



1-автотрансформатор 500/1150 кВ; 2-выключатель 1150 кВ; 3-шунтирующий выключатель 1150 кВ; 4-защитный аппарат типа ОПН-1150 [16]

**Рисунок 5 – Принципиальная схема полуволновой передачи электроэнергии 1150 кВ**

Полуволновые линии отличаются от обычных линий и компенсированных линий переменного тока следующими свойствами: независимость фазового сдвига между напряжениями на концах линии от передаваемой мощности; тождественность полуволновой линии по критерию устойчивости с линией нулевой длины; сбалансированность по реактивной мощности во всех режимах; прямо пропорциональная зависимость напряжения в середине линии от передаваемой мощности; возможность шунтирования полуволновой линии в средней точке. Наличие таких свойств полуволновых линий говорит о том, что решение теоретических и практических вопросов таких линий требует особого подхода [16]. Вопросы регулирования напряжения, защиты линий, подавления перенапряжения и вторичной дуги, изоляции линии и экономического анализа линии рассмотрены в [18,19].

При сверхдальних электропередачах, передается большие потоки мощности на значительные расстояния, и аварийные отказы могут заметно повлиять на надежность работы энергосистемы. Поэтому при передаче электроэнергии должны учитываться и проблемы надежности. Распространенным решением проблемы надежности для широко используемых в мире дальних электропередач является использование двухцепных секционированных линий. Однако для сверхдальних передач электроэнергии по экологическим и экономическим причинам, разумно использовать одноцепные электропередачи. Это допустимо, если гарантируется одинаковый уровень надежности в этих вариантах при ликвидации однофазных повреждений. Если бы все однофазные КЗ были неустойчивыми, то использование однофазного автоматического повторного включения (ОАПВ) позволило бы обеспечивать должный уровень надежности. В полуволновых линиях вопрос ликвидации однофазных повреждений приобретает особую значимость, поскольку их число в несколько раз больше чем, на обычных линиях. Для полуволновой линии выработаны методы, с помощью которых обеспечивается снижение токов дуги подпитки и восстанавливающих напряжений для успешного гашения дуги. Однако число устойчивых однофазных КЗ может достигнуть 30-50%.



Поэтому ОАПВ не может полноценно решить проблему надежности. Однофазные аварии эффективно ликвидируются с помощью использования двухфазных режимов. В такой ситуации при однофазном КЗ неисправная фаза отключается и линия переходит на работу по двухфазной системе. Более кардинально надежность можно обеспечить используя одноцепные ВЛ с резервной фазой [16].

Рассматривая разные виды электропередачи, необходимо принимать к сведению характеристики надежности схемы. Так как низкая надежность означает дополнительные затраты энергосистеме из-за аварийных отказов. А это в свою очередь сказывается на экономической составляющей электропередачи.

#### 1.4 Резонансная однопроводная линия электропередачи

Резонансный метод передачи электроэнергии является неординарным, поскольку в резонансных линиях электропередачи энергия передается по одному тонкому проводу-волноводу на повышенной частоте в виде реактивной энергии без джоулевых потерь [20].

Резонансная однопроводная линия электропередачи (РО ЛЭП) состоит из: источника электрической энергии, преобразователя частоты ПЧ1, резонансного контура (С1, Т1), однопроводной ЛЭП, приемного резонансного контура (С2, Т2), преобразователя частоты ПЧ2 к которому присоединяется нагрузка. Схему резонансной однопроводной ЛЭП вы можете увидеть в рис.6. ПЧ1 предназначен для повышения частоты напряжения от промышленного (50-60 Гц) до высокочастотного в пределах 1-100 кГц. Напряжение повышенной частоты подаётся в резонансный контур, состоящий из конденсатора С1 и улучшенного трансформатора Тесла Т1. Для возникновения резонанса напряжений необходимо правильно рассчитать соотношение индуктивностей первичной и вторичной обмоток и ёмкостей, включая межвитковую ёмкость трансформатора. При выполнении этого условия возникает резонанс напряжений. Ток в обмотке сдвинут по отношению к напряжению на  $90^{\circ}$ . Один конец этой обмотки можно заземлить. К другому выводу соединяется одножильный кабель ОЛ расчетной длины. Длина ОЛ, включая высоковольтных обмоток передающего и приёмного трансформаторов и длины кабеля, должна соответствовать целому числу полуволн  $\lambda/2$ , либо четверти волны тока. Длина линии, длина волны, скорость ее распространения, резонансная частота связаны следующими соотношениями [20,21]:

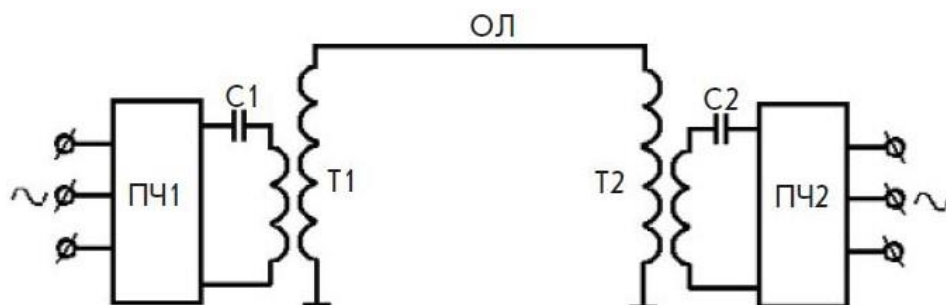
$$l = \frac{n\lambda}{2}; \quad f_0 = \frac{cn}{2l}; \quad \lambda = \frac{2l}{n},$$

где  $n$  – натуральное число.

Другой конец линии присоединяется к приемному трансформатору Тесла Т2, который также работает в резонансном режиме. Для получения

трехфазного напряжения промышленной частоты к низкой стороне трансформатора Т2 подключают преобразователь частоты ПЧ2 [20,21].

Так как однопроводная линия разомкнута, в ней нет активного тока, поэтому, электрические потери в линии отсутствуют. Ток линии представляется как реактивный ток перезарядки собственной ёмкости линии [20,21].



**Рисунок 6 – Схема резонансной однопроводной ЛЭП [20,21]**

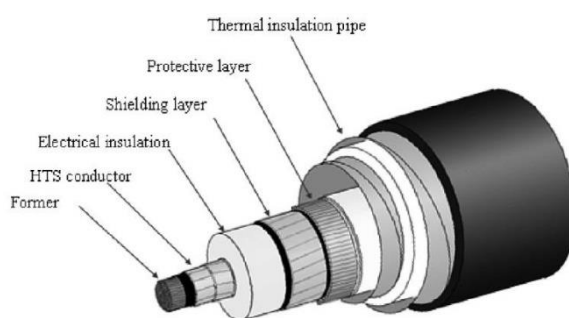
Представления о природе радиоволн очень помогают для понимания физических процессов, происходящих при передаче энергии по РО ЛЭП, потому как уже было сказано передача энергии по однопроводной линии имеет волновой характер. Указанные явления имеют место в линии, длина которой равна длине полуволны или четверти волны тока. Резонанс, возбуждающий трансформаторы Тесла, обеспечивает максимальную отдачу энергии и способствует появлению в линии исключительно реактивного тока, который не связан с джоулевыми потерями в линии. Предполагается, что это возможно, когда ток полностью выходит за пределы проводника и не взаимодействует с оболочкой металла провода. Иными словами, электромагнитные процессы происходят не в самом проводе, а вокруг него [20].

### **1.5 Сверхпроводящие кабельные линии**

Одним из способов передачи большого количества электрической энергии является использование сверхпроводящих кабельных линий. Исследования в области сверхпроводящих материалов и открытие высокотемпературного сверхпроводника раскрыли новые возможности для разработчиков электроэнергетических и электротехнических устройств. Для охлаждения высокотемпературного сверхпроводника можно использовать относительно дешевый и доступный жидкий азот, что позволило сконструировать экономически выгодные сверхпроводящие устройства [22].

В качестве примера такого проекта можно представить высокотемпературный сверхпроводящий кабель с напряжением 275 кВ, который был разработан в Японии. Структура ВТСП-кабеля 275 кВ такова,

что несколько сверхпроводящих лент намотаны по спирали на центральный сердечник, называемый формером, который покрыт слоем электроизоляции, а затем сверхпроводящим экранирующим слоем и защитным слоем, совокупность всех этих слоев составляют сердечник самого кабеля. Сердечник размещен в теплоизоляционной трубе, по которой течет жидкий азот, как показано на рис. 7. Электроизоляционный слой сформирован из намотанных многослойных диэлектрических бумаг, а защитный слой состоит из слоев медной ленты и слоев диэлектрической ленты. Жидкий азот течет в зазоре между сердечником кабеля и внутренней частью теплоизоляционной трубы, чтобы охладить сердечник при температуре жидкого азота. Этот кабель может передавать электрическую мощность 1500 МВА, при токе 3кА. Мощность передачи в два или три раза больше, чем при использовании кабеля из сшитого полиэтилена XLPE [23].



**Рисунок 7 – Структура высокотемпературного сверхпроводящего кабеля 275 кВ [23]**

В электрических сетях возможно создание схемы с применением ВТСП КЛ как переменного, так и постоянного токов. Обе системы имеют свои предпочтительные области применения и в конечном итоге выбор определяется и техническими, и экономическими соображениями.

.ВТСП КЛ переменного тока целесообразны в тех случаях, когда необходима передача больших потоков электроэнергии на распределительном напряжении, а также замене воздушных линий на кабельные без изменения класса напряжения. Возможна также передача энергии непосредственно с шин генератора на подстанцию или в распределительную сеть.

ВТСП КЛ постоянного тока, выполняя те же функции, что и ВТСП КЛ переменного тока, способны также осуществлять функцию ограничения токов короткого замыкания и управление потоками мощности. Поэтому в тех случаях, когда помимо передачи больших потоков мощности на низком напряжении требуется еще и обеспечить и функцию ограничения токов короткого замыкания и управления мощностью, что характерно для мегаполисов, ВТСП КЛ постоянного тока наиболее предпочтительны. Кроме того, сверхдальние кабельные передачи возможны только при использовании линий постоянного тока.

Высокотемпературные сверхпроводящие кабельные линии постоянного и переменного тока являются инновацией, которая может решить большую часть проблем электрических передач. Однако использование ВТСП КЛ постоянного тока позволяет увеличить качество передачи. Многие дополнительные преимущества ВТСП КЛ постоянного тока по сравнению с линиями переменного тока изложены ниже:

- ограничение токов короткого замыкания;
- увеличение устойчивости сети и ликвидация каскадных отключений потребителей за счет взаимного резервирования энергосистем;
- регулирование распределения потоков мощности в параллельных линиях;
- передача мощности с минимальными потерями в кабеле;
- возможность подключения несинхронизированных энергосистем.

Благодаря сверхпроводящим кабелям можно передавать электроэнергию на генераторном напряжении, без каких-либо повышающих и понижающих трансформаторов. Такая схема особенно удобна для ввода больших потоков энергии в мегаполисы. Однако передача электроэнергии на дальние расстояния со сверхпроводящими кабелями является экономически нецелесообразным. Так как для охлаждения этих кабелей требуются криорефрижераторные подпитывающие пункты [22].

## 1.6 Сравнение технологий

В предыдущих частях были приведены основные технологии передачи электроэнергии на дальние расстояния. Теперь стоит ответить на вопрос «Какая из технологий является наиболее эффективной?». Однако говорить о преимуществах и эффективности той или иной технологии стоит исходя из конкретного случая и локации. Поэтому в данной работе в качестве примера рассматривается линия электропередачи переменного тока Север-Юг Казахстана, обслуживаемая компанией по управлению электрическими сетями Казахстана KEGOC. Данная линия электропередачи была выбрана по причине того, что KEGOC рассматривает возможность модернизации данной линии в будущем. Также одна из главных причин - данная линия является одним из важных в структуре электроэнергетической системы Казахстана соединяющая южную зону Казахстана, потребляющая 21940 млн.кВт·ч энергии, с центрами выработки электрической энергии, которые расположены в северных и центральных зонах. Общая протяженность данной линии 1096 км.

*Экономическая составляющая.* По экономической составляющей известно, что преобразовательные подстанции, которые нужны для преобразования переменного тока на постоянный, являются очень дорогими в сравнении с обычными повышающими или понижающими подстанциями. Поэтому подстанции высоковольтных линий электропередач переменного

тока экономически выгоднее. Однако на общую стоимость высоковольтных линий также влияют многие другие факторы такие как: опоры, проводники, изоляторы, стоимость земли и т.д. И так как линии на постоянном токе отличаются большей пропускной способностью строительство именно линий электропередач на постоянном токе экономически выгоднее. Учитывая все эти условия можно заключить что экономическая выгода линий электропередачи на постоянном или переменном токе зависит от длины линий. Подсчитано что при длине 600-700 км экономическая выгода линий на постоянном токе возрастают [24]. И так как в нашем примере протяженность линий выше 700 км экономически выгоднее передача на постоянном токе.

Экономическая выгода резонансной однопроводной линии электропередачи обусловлено тем что устройства, которые используются в данной технологии схожи с устройствами применяемые в преобразовательных подстанциях высоковольтных линий постоянного тока. Но так как электрическая энергия передается по одному относительно тонкому проводу то и стоимость строительных работ и монтажных работ линий электропередач будет ниже. Соответственно эта технология экономически выгоднее чем высоковольтные линии постоянного и переменного тока.

Применение полуволновой электрической передачи на расстояние 1096 км экономически нецелесообразно. Так как использование полуволновой электропередачи без каких-либо вспомогательных устройств возможно только при длине линии 3000 км ( $\pm 300$  км), и, если длина меньше длины полуволновой используются устройства реактивной мощности для настройки на полуволну. То есть никакого экономического преимущества в сравнении с другими способами не имеется.

*Пропускная способность.* Более высокая пропускная способность одна из преимуществ высоковольтных линий электропередач постоянного тока над обычными линиями переменного тока. Известно, что по одним и тем же проводам на постоянном токе можно передавать гораздо больше энергии нежели на переменном.

Полуволновой способ электрической передачи также отличается высокой пропускной способностью, при определенных условиях ( $f=50$  Гц,  $l=3000$  км). Однако, не известно будет ли пропускная способность такой же высокой при иных условиях и при использовании устройств реактивной мощности.

На сегодняшний день невозможно делать выводы про пропускную способность резонансной однопроводной линии электропередачи. Так как очень мало данных про данный способ передачи и на опыте реализовано только передача 20 кВт с длиной линии 1,2 км, технически решен вопрос передачи 100 кВт [20,21]. Но даже на данном этапе можно сделать вывод что с помощью этого способа можно снабжать энергией потребителей, с

небольшой нагрузкой, которые расположены далеко от источников электроэнергии.

*Надежность.* Обеспечение надежности при передаче электроэнергии это одна из приоритетных задач которые инженеры ставят перед собой. При сравнении надежности линии электропередач постоянного и переменного тока трудно отдавать предпочтение одному из них. Однако если сравнивать в контексте сложной электроэнергетической системы, выявляются некоторые системные эффекты при использовании ЛЭП постоянного тока. Вследствие автономности полюсов передачи постоянного тока и возможности использования исправного полюса можно снизить наброс мощности на параллельные связи и недостаток энергии в потребляющей стороне энергосистемы благодаря которому можно увеличить уровень надежности передачи. Благодаря несинхронным связям постоянного тока возможность распространения аварии на смежные части энергосистемы значительно меньше. Также, за счет систем управления преобразовательными подстанциями риск каскадного развития аварий невелико при синхронных связях энергосистемы.

Конструкция полуволновых линии электропередач не сильно отличается от обычных высоковольтных линий электропередач переменного тока. Поэтому можно утверждать, что степень надежности у этих линии одинакова. И для повышения уровня надежности полуволновых линий электропередач возможно использование способов применяемые для повышения надежности в обычных линиях переменного тока. Например, однофазное автоматическое повторное включение или линии с резервной фазой.

подавляющее большинство отказов при передаче электрической энергии на дальние расстояния происходят из-за однофазных повреждений [16]. И так как при использовании резонансной однопроводной технологии электропередачи невозможны короткие замыкания можно утверждать, что уровень надежности этой технологии высока.

*Потери.* Потери в линиях электропередач зависят от многих параметров, в частности от активных и реактивных сопротивлений линий. И если принять во внимание что потери в линиях постоянного тока зависят только от активного сопротивления, а в линиях переменного тока совокупностью потерь на активном и реактивном сопротивлениях, а также за счет емкостных токов [25], можно утверждать, что потери в линиях постоянного тока меньше чем в линиях переменного тока обычного типа и полуволнового типа. Подробная информация про потери в линиях постоянного и переменного тока и их сравнение приведены в [25].

**Таблица 1 – Сравнение показателей ЛЭП на 35 кВ**

№	Виды ЛЭП	Критерии оценки				
		Расходы на строительства 1 км ЛЭП	Надежность	Пропускная способность, Вт	Потери на 1 км, Вт	Максимальное расстояние, км
1	<b>HVDC</b>	Экономически нецелесообразно				
2	<b>HVAC</b>	17 780	Высокая	4-10*10 <sup>6</sup>	755 240	25
3	Полуволновая ЛЭП	Не применяется				
4	Резонансная ЛЭП		Высокая	0,45*10 <sup>6</sup>	90	25
5	Сверхпроводящая ЛЭП	Не применяется				

**Таблица 2 – Сравнение показателей ЛЭП на 330 кВ**

№	Виды ЛЭП	Критерии оценки				
		Расходы на строительства 1 км ЛЭП	Надежность	Пропускная способность, Вт	Потери на 1 км, Вт	Максимальное расстояние, км
1	<b>HVDC</b>	61 320	Высокая	1000*10 <sup>6</sup>	5 508	300
2	<b>HVAC</b>	73 100	Высокая	400*10 <sup>6</sup>	39198	300
3	Полуволновая ЛЭП	Не применяется				
4	Резонансная ЛЭП		Высокая	32,2*10 <sup>6</sup>	536	300
5	Сверхпроводящая ЛЭП	5.5*10 <sup>6</sup>	Высокая	2*10 <sup>9</sup>	3600	

**Таблица 3 – Сравнение показателей ЛЭП на 500 кВ**

№	Виды ЛЭП	Критерии оценки				
		Расходы на строительства 1 км ЛЭП	Надежность	Пропускная способность, Вт	Потери на 1 км, Вт	Максимальное расстояние, км
1	<b>HVDC</b>	99 000	Высокая	4000*10 <sup>6</sup>	30 800	600-1200
2	<b>HVAC</b>	92 000	Высокая	900*10 <sup>6</sup>	72 833	600-1200
3	Полуволновая ЛЭП	Не применяется				
4	Резонансная ЛЭП		Высокая	70,8*10 <sup>6</sup>	442,5	1200
5	Сверхпроводящая ЛЭП	Не применяется				

## **Выводы по главе**

В данной главе был проведен обзор технологиям электропередачи на дальние расстояния, анализ этих технологий по экономическим и технологическим критериям на разных уровнях напряжения. По определенным причинам на сегодняшний день все большую актуальность приобретает передача энергии на постоянном токе. Однако не стоит забывать, что большую часть линий электропередач составляют линии на переменном токе, которые также могут модифицироваться. Рассматривая ту или иную технологию для передачи электроэнергии нужно исходить от конкретно данного случая и анализировать насколько это будет выгодно по экономическим соображениям, выяснить насколько это эффективно с технологической точки зрения. Поскольку самыми распространенными видами передачи электрической энергии является системы постоянного тока и переменного тока, ожидается что это приведет к гибридным системам постоянного и переменного тока. Другие виды передачи электроэнергии рассмотренных в данной главе нуждаются в исследованиях в данном контексте проблемы, в условиях сложной электроэнергетической системы.



## 2 Расчет параметров ЛЭП на переменном и постоянном токе

### 2.1 Расчет напряжения и параметров ВЛ переменного тока

Расположение рассчитываемого участка напряжением 500 кВ показано на рисунке 2.1 [26].

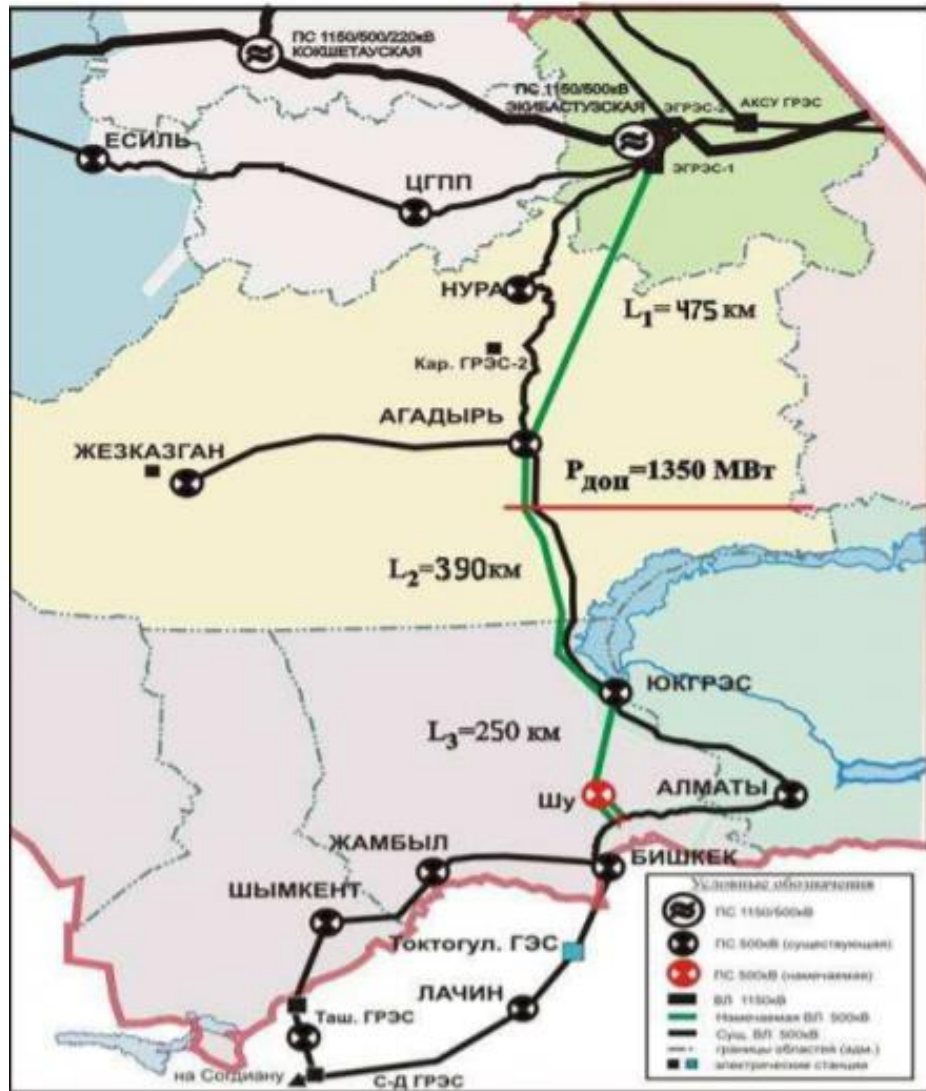


Рисунок 2.1 – Схема передачи электроэнергии Север-Юг Казахстана

Так как длина ЛЭП – 1096 км, а передаваемая мощность – 1000 МВт расчет напряжения проводится по формуле Илларионова, которая предназначена для определения напряжения ЛЭП длиной до 1000 км и передаваемой мощности более 60 МВт [27]:

$$U = \frac{1000}{\sqrt{\frac{500}{L} + \frac{2500}{P}}} = \frac{1000}{\sqrt{\frac{500}{1096} + \frac{2500}{1000}}} = 581 \text{ кВ} \approx 750 \text{ кВ}$$

где  $L$  – длина линии;  
 $P$  – активная передаваемая мощность.

Полная передаваемая мощность по линии электропередачи [28]:

$$S = \frac{P}{\cos \varphi} = \frac{1000}{0.9} = 1111.1 \text{ МВА}$$

Тогда реактивная мощность в линиях электропередачи определяется следующим образом [28]:

$$Q = \sqrt{S_4^2 - P_4^2} = \sqrt{1111.1^2 - 1000^2} = 484.3 \text{ МВАр}$$

Рассчитанное значение напряжения проверяется на возможные потери напряжения на ЛЭП [28]:

$$\Delta U = I \sqrt{R^2 + x^2} = 494,79 \sqrt{55,896^2 + 373,73^2} = 186,9 \text{ кВ} \quad (4)$$

где  $R$  - активное сопротивление линии, Ом;  
 $x$  - реактивное сопротивление линии, Ом.

### **Расчет сечения ЛЭП переменного тока и выбор марки провода**

Сечение ЛЭП находится через определения расчетного тока для проверки по условию экономической плотности тока

Расчетный ток ЛЭП зависит от передаваемой мощности и напряжения и находится по следующей формуле [29]:

$$I_p = \frac{S_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}} = \frac{\sqrt{1000^2 + 484.3^2}}{1,73 \cdot 750} = 856 \text{ А,}$$

Так как на ЛЭП выше 220 кВ используется расщепление фазы, необходимо найти фазный ток и разделить его на число проводов в одной фазе:

$$I_{p1} = \frac{I_p}{1.73} = \frac{856}{1.73} = 494,79 \text{ А}$$

$$I_{p2} = \frac{I_{p1}}{n} = \frac{494,79}{3} = 164,93 \text{ А}$$

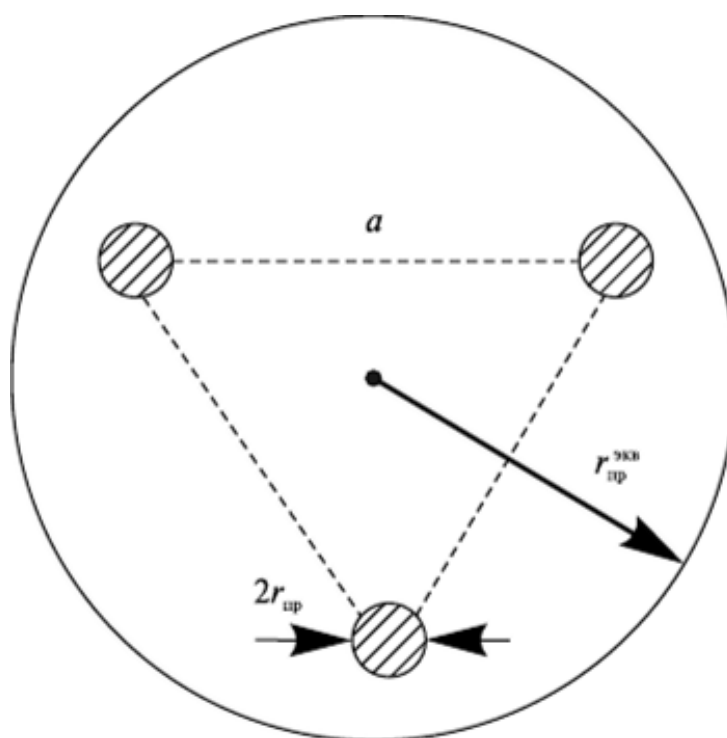
где  $n$  – число проводов в одной фазе.

Выбор экономического сечения является минимальной величиной приведенных потерь. Сечение которое подходит приведенным минимальным значениям потерь – называется экономическим сечением. Экономическое сечение выбирается по нормированным значениям экономической плотности тока, и определяется по следующей формуле [29]:

$$S_{\text{эк}} = \frac{I}{j_{\text{эк}}} = \frac{131,98}{1,0} = 164,93 \text{ мм}^2,$$

где  $j_{\text{эк}}$  – экономическая плотность тока, ( $j_{\text{эк}}=1,0 \text{ А/мм}^2$ )

По найденному значению и согласно ПУЭ были выбраны 3 стально-алюминиевые провода марки АС-180/24, и так как напряжение на ЛЭП выше 220 кВ необходимо использовать расщепление проводов фаз (рис.2.2).



**Рисунок 2.2 – Конструкция расщепленной фазы**

Расчет сопротивления ЛЭП:

Удельное активное сопротивление ЛЭП[29]:

$$r_{01} = \frac{\rho}{S} = \frac{28,8}{140} = 0,1540 \text{ Ом/км};$$

Удельное активное сопротивление фазы линии с расщепленными проводами определяется следующим образом [29]:

$$r_0 = r_{0np} / n_\phi = 0,1540 / 3 = 0,051 \text{ Ом/км},$$

Радиус провода вычисляется по формуле [29]:

$$r_{np} = \frac{D}{2} = \frac{1,89}{2} = 0,945 \text{ см};$$

В линиях электропередачи при  $U_{\text{ном}} \geq 330$  кВ провод каждой фазы расщепляется на несколько проводов. Это соответствует увеличению эквивалентного радиуса, определяемый по следующей формуле [29]:

$$r_{\text{эк}} = \sqrt[n_\phi]{r_{np} a_{cp}^{n_\phi - 1}} = \sqrt[3]{0,945 \cdot 40^2} = 11,478 \text{ см}$$

$D_{\text{ср}}$ -среднегеометрическое расстояние между фазами, см, определяемое следующим выражением [29]:

$$D_{\text{ср}} = \sqrt[3]{D_{1-2} \cdot D_{2-3} \cdot D_{1-3}} = \sqrt[3]{19,5 \cdot 19,5 \cdot 39} = 2456 \text{ см}$$

Удельное индуктивное сопротивление фазы определяется по следующей формуле [29]:

$$x_0 = 0,144 \cdot \lg \left( \frac{24,56}{11,478} \right) + \frac{0,0157}{3} = 0,341 \text{ Ом/км};$$

Удельная индуктивность линии по прямой последовательности определяется по следующей формуле [29]:

$$L = 4,6 \cdot 10^{-4} \cdot \lg \frac{D_{\text{ср}}}{\sqrt[n_\phi]{\delta \cdot r_{\text{эк}}}} = 4,6 \cdot 10^{-4} \cdot \lg \frac{2456}{\sqrt[3]{0,81 \cdot 12,43}} = 10,69 \cdot 10^{-4} \text{ Гн/км}$$

Удельная индуктивность линии по прямой последовательности определяется по следующей формуле [29]:

$$L = \eta_0 \cdot 13,8 \cdot 10^{-4} \cdot \lg \frac{D_3}{\sqrt[3]{\sqrt[3]{\delta \cdot r_{\text{эк}}} \cdot D_{\text{ср}}^2}} = 1 \cdot 13,8 \cdot 10^{-4} \cdot \lg \frac{9,32}{\sqrt[3]{\sqrt[3]{0,81 \cdot 0,1243 \cdot 24,56^2}}} = 4,83 \cdot 10^{-4} \text{ Гн/км}$$

Активные и реактивные сопротивления ЛЭП:

$$R = r_0 \cdot l = 0,051 \cdot 1096 = 55,896 \text{ Ом};$$

$$X = x_0 \cdot l = 0,341 \cdot 1096 = 373,73 \text{ Ом};$$

Расчет потерь на ЛЭП:

$$\Delta P = 3I_{\text{расч}}^2 \cdot R_{\text{л}} \cdot 10^{-3} = 3 \cdot 3 \cdot 164,93^2 \cdot 55,896 \cdot 10^{-3} = 13684 \text{ кВт}$$

$$\Delta Q = 3I_{расч} \cdot X_{л} \cdot 10^{-3} = 3 \cdot 3 \cdot 164,93 \cdot 373,73 \cdot 10^{-3} = 554 \text{кВар}$$

## 2.2 Расчет напряжения и параметров ВЛ постоянного тока

При проектировании ВЛ напряжением до 500 кВ включительно выбор сечения проводов производится по нормированным обобщенным показателям. В качестве таких показателей используются нормированные значения экономической плотности тока.

Расчетный ток ЛЭП зависит от передаваемой мощности и напряжения и находится по следующей формуле[30]:

$$I_p = \frac{S_{\max} / 2}{U} = \frac{1111.1 / 2}{750} = 740 \text{А}$$

Суммарное сечение (F) проводов фазы проектируемой ВЛ составляет:

$$S_{\text{эк}} = \frac{I_p}{j_{\text{эк}}} = \frac{740}{1,0} = 740 \text{мм}^2,$$

где:  $I_p$  – расчетный ток, А;

$j_{\text{н}}$  – нормированная плотность тока, 1.0 А/мм<sup>2</sup>.

По найденному значению был выбран стали-алюминиевый провод марки АС 750/93

Расчет сопротивления ЛЭП:

$$r_{01} = \frac{28,8}{746} = 0,0386 \text{Ом/км};$$

$$R_{01} = 0,0386 \cdot 1096 = 42,3 \text{Ом};$$

$$X_{01} = 0 \cdot 462 = 0 \text{Ом};$$

Расчет потерь на ЛЭП [30]:

$$\Delta P = n \cdot I_{расч}^2 \cdot r = 1 \cdot 740^2 \cdot 0,0386 = 21,1 \text{кВт}$$

где  $n$  – число проводов в одной секции;

$r$  – удельное активное сопротивление.

По выявленному значению расчетного тока и сопротивления провода рассчитывается возможные потери напряжения:

$$\Delta U = I_p \cdot R = 593 \cdot 42,3 = 25 \text{кВ}$$

### **Выводы по главе**

В данной главе согласно анализу сделанной в первой главе были рассчитаны параметры линии электропередачи транзита Север-Юг Казахстана на переменном и постоянном токе. Отличительной стороной расчета является то что рассчитываемая ЛЭП в сравнении с реальной ЛЭП представляет собой цельную линию без распределительных пунктов мощностей и подпитки реактивной мощности. На основе расчетов можно сделать вывод что передача электроэнергии на постоянном токе более выгодна в данных конкретных условиях.

## **3 Моделирование и исследование передачи электроэнергии на дальние расстояния**

### **3.1 Моделирование и исследование высоковольтной ЛЭП переменного тока**

Программная среда MATLAB на сегодняшний день является многопрофильным и незаменимым средством решения задач в разных областях. С помощью пакета Simulink и библиотеки блоков SimPowerSystems было смоделировано высоковольтная ЛЭП переменного тока участка Север-Юг Казахстана (рис.3.1). В основу прогормамной модели легли данные расчетов проведенных во второй части работы. Основные из них - значения сопротивления ЛЭП, нагрузки и источника напряжения, показанные на рис.3.2.

Источник переменного напряжения моделируется при помощи блока Three-Phase Programmable Voltage Source, который характеризуется следующими параметрами:

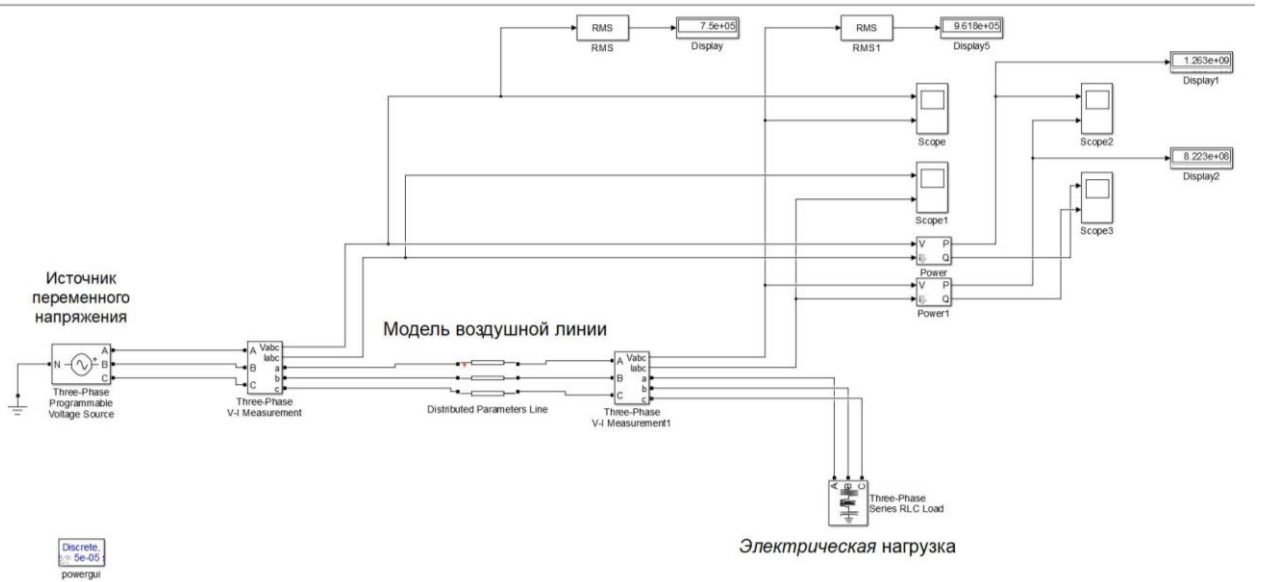
- действующее значение напряжения, В;
- начальная фаза напряжения, установленный нами равной  $0^0$ ;
- частота сети, Гц.

Для моделирования основных параметров ЛЭП использовалось блок Distributed parameters line. Основные параметры ЛЭП:

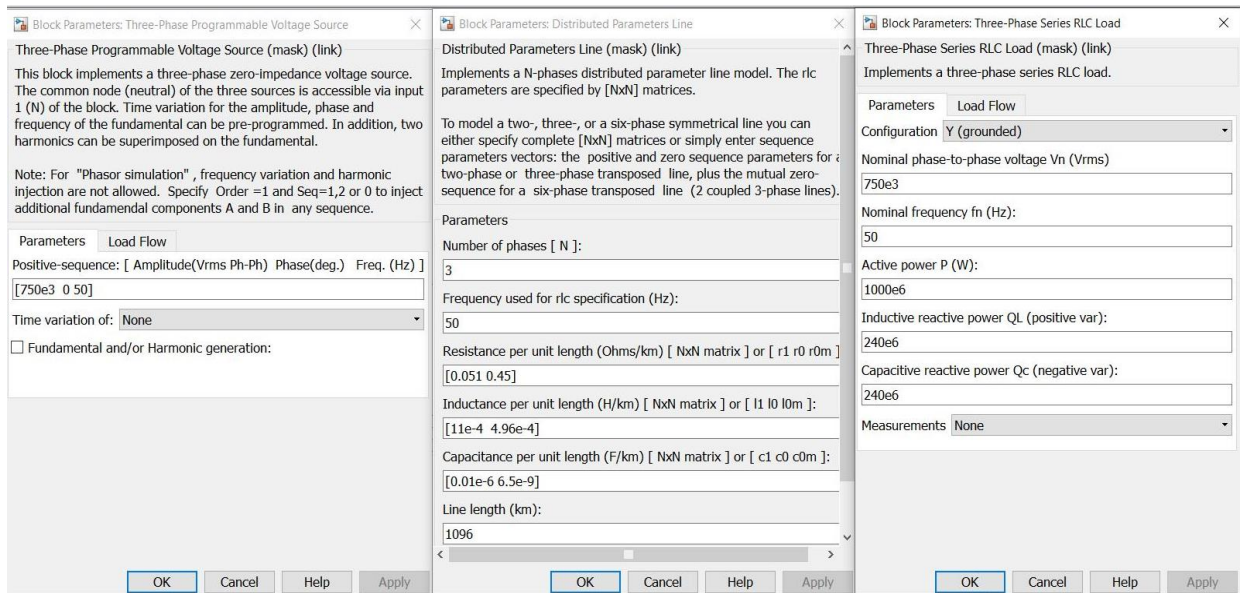
- активное сопротивление, Ом;
- индуктивное сопротивление, Гн;
- ёмкостное сопротивление, Ф.

Электрическая нагрузка моделируется блоком Three-Phase RLC Load, характеризующийся следующими параметрами:

- номинальное значение напряжения, В;
- частота сети, Гц;
- активная мощность, Вт;
- индуктивная реактивная мощность, ВАр;
- ёмкостная реактивная мощность, ВАр.

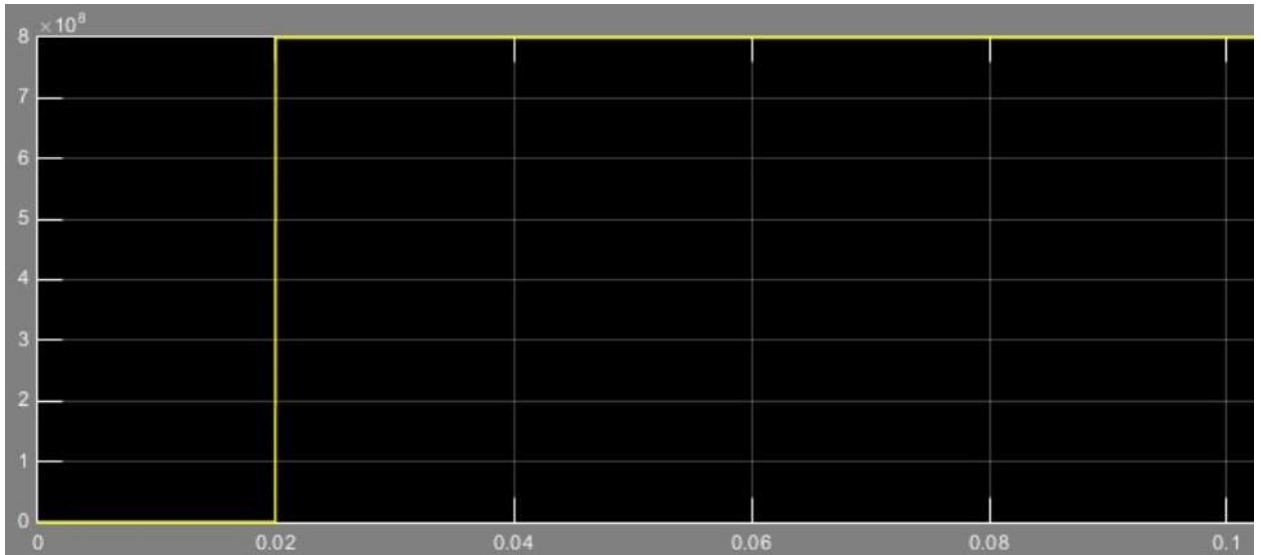


**Рисунок 3.1 – Модель высоковольтной ЛЭП переменного тока**

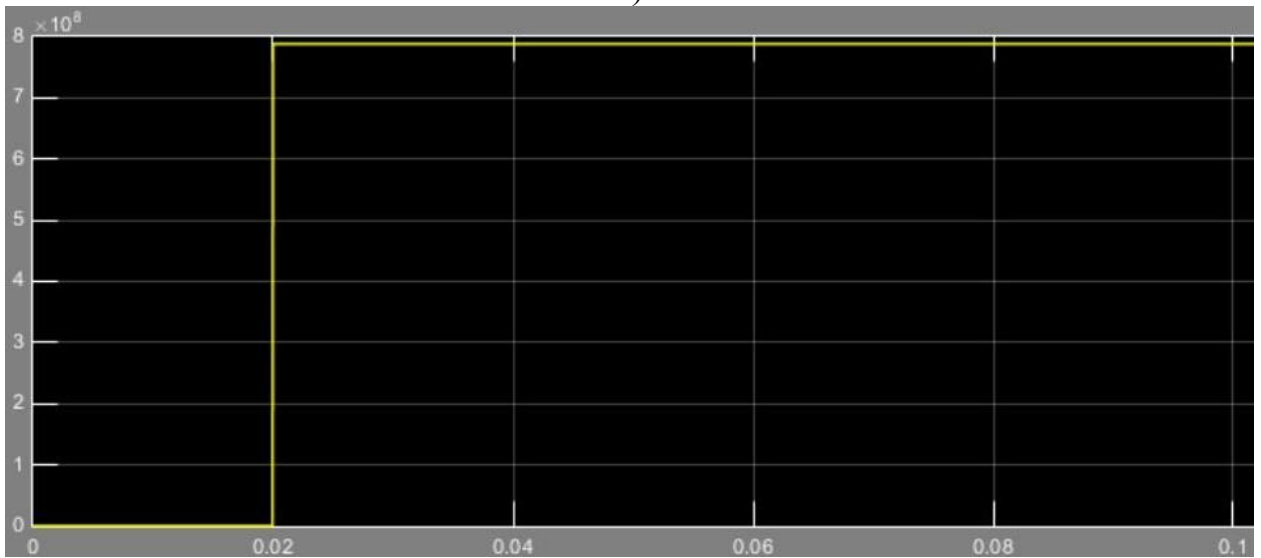


**Рисунок 3.2 – Основные данные ЛЭП**



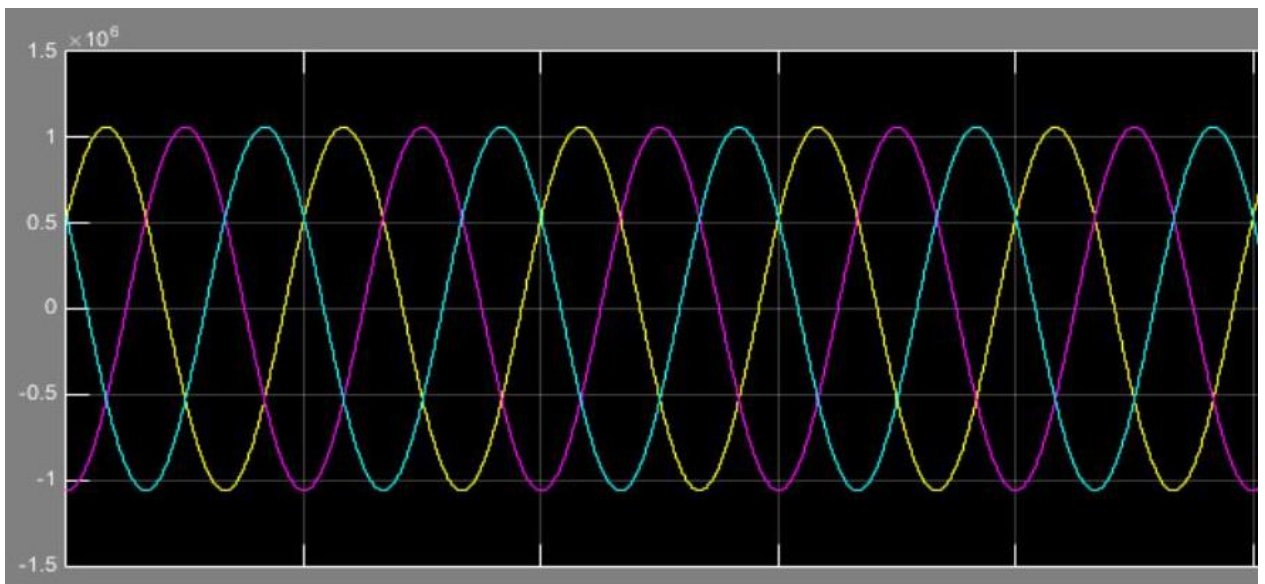


а)

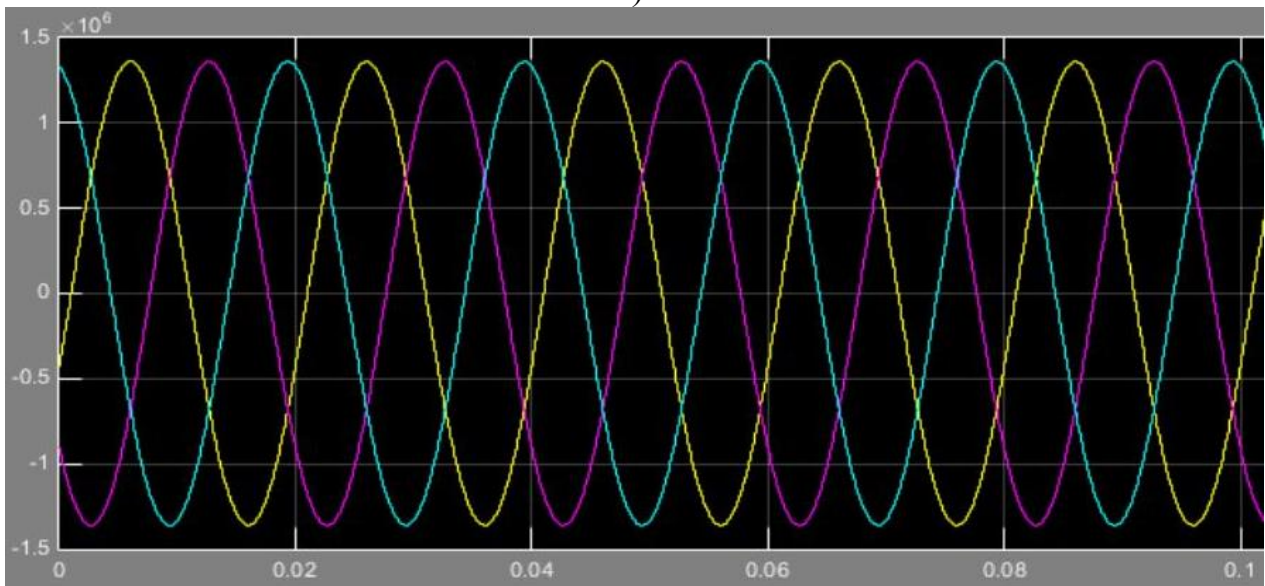


б)

**Рисунок 3.3 – Показатели значения передаваемой активной мощности:  
а) до линии электропередачи; б) после ЛЭП**



а)



б)

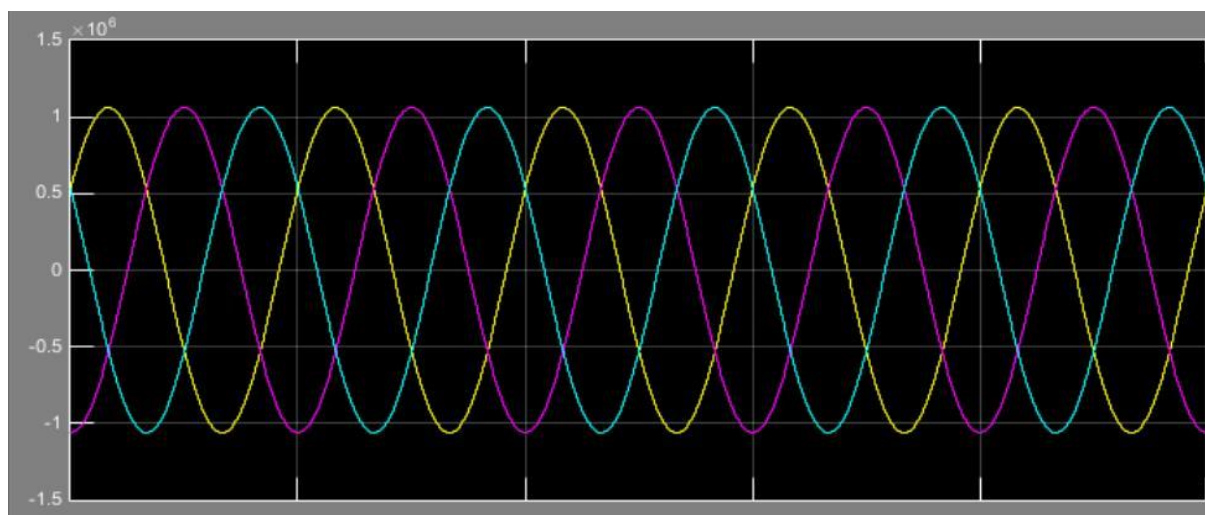
**Рисунок 3.4 – Показатели значения напряжения: а) до линии электропередачи; б) после ЛЭП**

Вывод: Согласно с данными расчета передаваемая активная мощность составляет 1000 МВт. Для получения такого значения мощности в блоке источника переменного напряжения было выставлено среднеквадратичное значение напряжения 750 кВ, ток при этом равен 2.3 кА. Для определения и сравнения передаваемой активной мощности и других основных параметров линии были подключены измерительные блоки на обоих концах ЛЭП. По сведениям измерительных блоков активная мощность в начале линии равно 1038 МВт, в конце линии 561 МВт, из чего следует что активные потери на ЛЭП равны 477 МВт. Напряжение в начале линии равно 750 кВ, в конце линии равно 868 кВ. Это связано с резонансным эффектом возникающим в ЛЭП из за их индуктивных и емкостных свойств. Резонансный эффект может

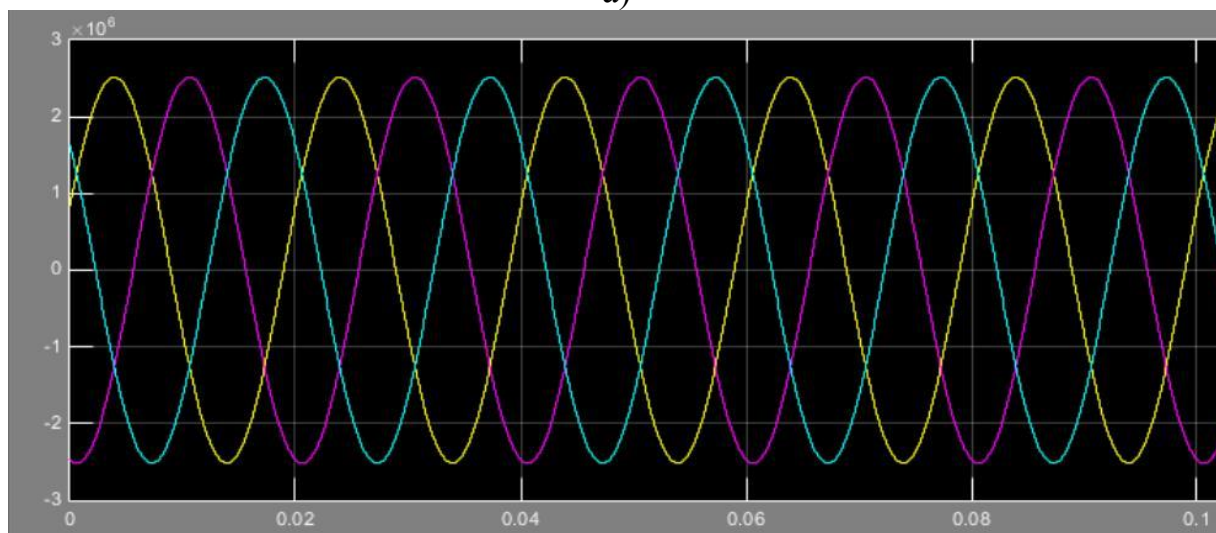
увеличить напряжение на конце линии в несколько раз от номинального значения. Для предотвращения резонанса на линиях устанавливают средства компенсации реактивной мощности [31] .

### 3.1.1 Моделирование высоковольтной ЛЭП переменного тока в режиме холостого хода

В режиме холостого хода мощность и ток в конце линии равны нулю. Значение напряжения показано на рис.3.5



а)



б)

**Рисунок 3.5 – Показатели значения напряжения: а) до линии электропередачи; б) после ЛЭП**

### 3.1.2 Моделирование высоковольтной ЛЭП переменного тока в режиме вариации активной мощности

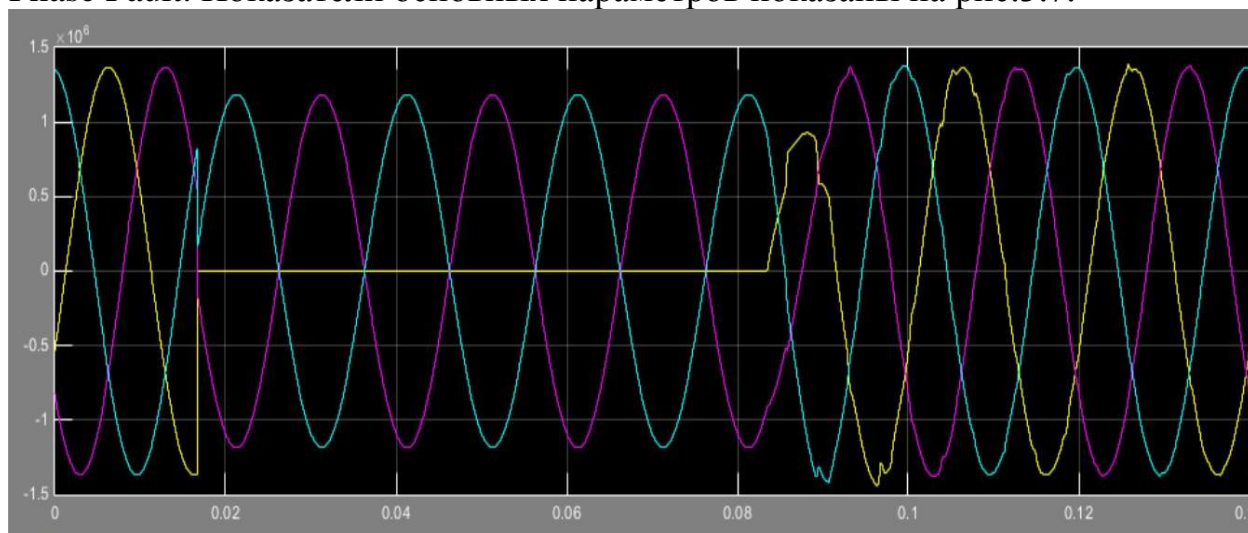
Данные о имитации работы ЛЭП в режиме постоянства коэффициента мощности приведены в таблице 3.1.

**Таблица 3.1 – Результаты моделирования ЛЭП в режиме вариации активной мощности**

Р, МВт	U <sub>нач</sub> , кВ	U <sub>кон</sub> , кВ	ΔU, кВ	P <sub>вых</sub> , МВт
500	750	1104		366
750	750	980		502
1000	750	868		561
1250	750	772		576

### 3.1.3 Моделирование высоковольтной ЛЭП переменного тока в режиме к.з.

Имитация короткого замыкания проводится с помощью блока Three Phase Fault. Показатели основных параметров показаны на рис.3.7.



а)



б)

**Рисунок 3.6 – Показатели а) напряжения; б) тока при к.з.**

### 3.1.4 Моделирование высоковольтной ЛЭП переменного тока в режиме постоянства коэффициента мощности

Данные о имитации работы ЛЭП в режиме постоянства коэффициента мощности приведены в таблице 3.2.

**Таблица 3.2 – Результаты моделирования ЛЭП в режиме постоянства коэффициента мощности**

P, МВт	Q, МВАр	U <sub>нач</sub> , кВ	U <sub>кон</sub> , кВ	ΔU, кВ	P <sub>вых</sub> , МВт
500	240	750	1209		541
750	360	750	1013		570
1000	480	750	868		561
1250	600	750	752		524

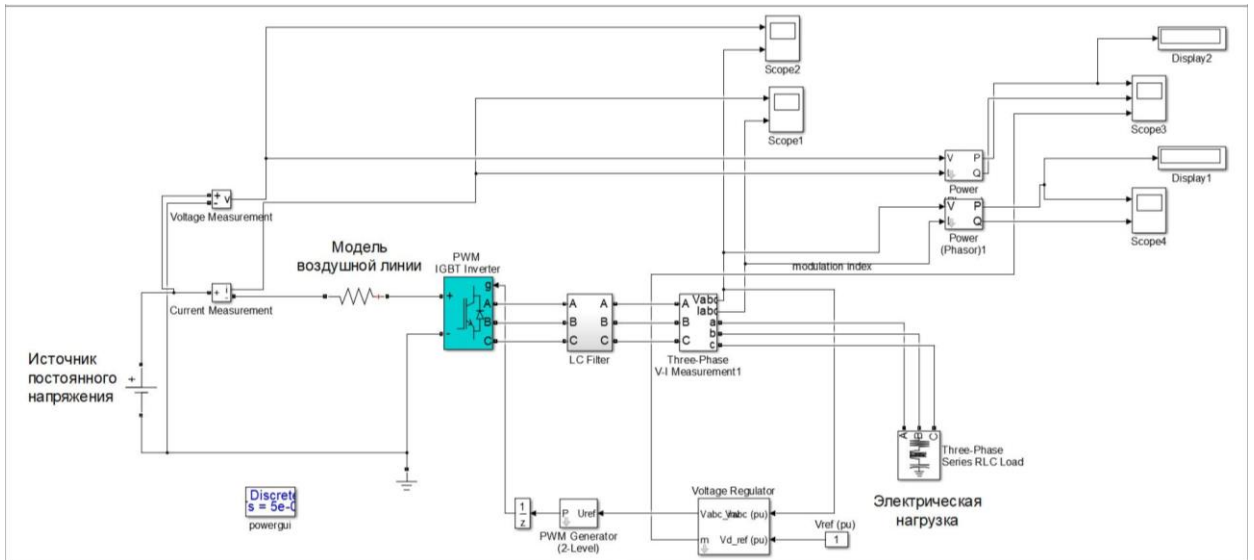
### 3.2 Моделирование высоковольтной ЛЭП постоянного тока

Моделирование ЛЭП постоянного тока проводится аналогично модели ЛЭП переменного тока. Однако, в данном случае источник постоянного напряжения моделируется блоком DC Voltage Source, характеризующийся амплитудным значением напряжения.

Модель самой воздушной линии также моделируется блоком RLC Branch, для имитации активного сопротивления ВЛ. Имитирование активного сопротивления и игнорирование других параметров ВЛ, обусловлено необходимостью создания идеальной модели.

Электрическая нагрузка моделируется с помощью блока RLC Branch, так как существующие блоки нагрузки работают только на переменном источнике.

Вывод: Для получения необходимого значения передаваемой активной мощности 1000 МВт, в блоке DC Voltage Source было выставлено значение 750 кВ. По показаниям измерительных блоков в начале линии электропередачи передаваемая активная мощность была равна 996 МВт, а в конце ЛЭП 847 МВт. Соответственно активные потери на ЛЭП составили 149 МВт.

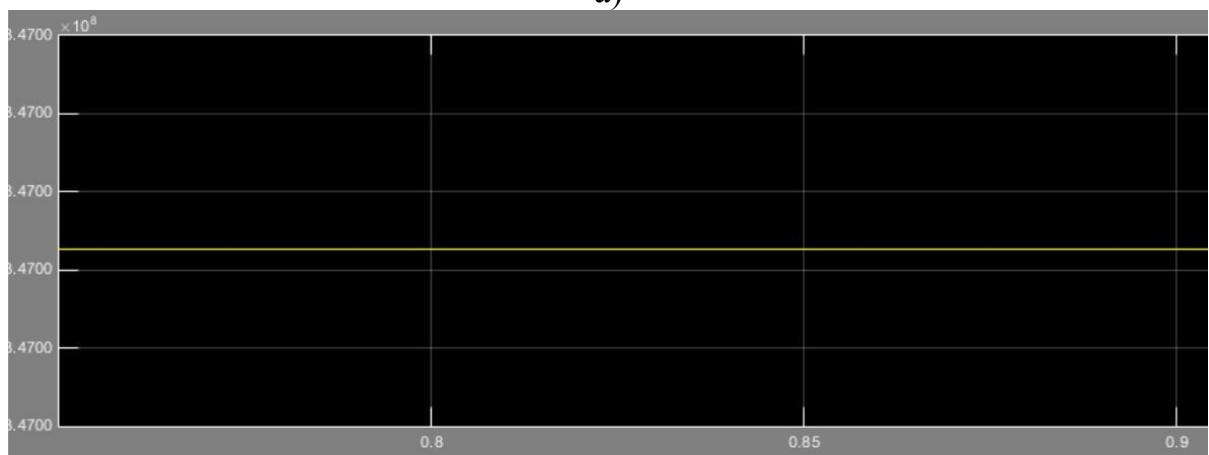


**Рисунок 3.7 – Модель высоковольтной ЛЭП постоянного тока**

Значение измеренных параметров ЛЭП показаны на рисунках – 3.4, 3.5.



а)

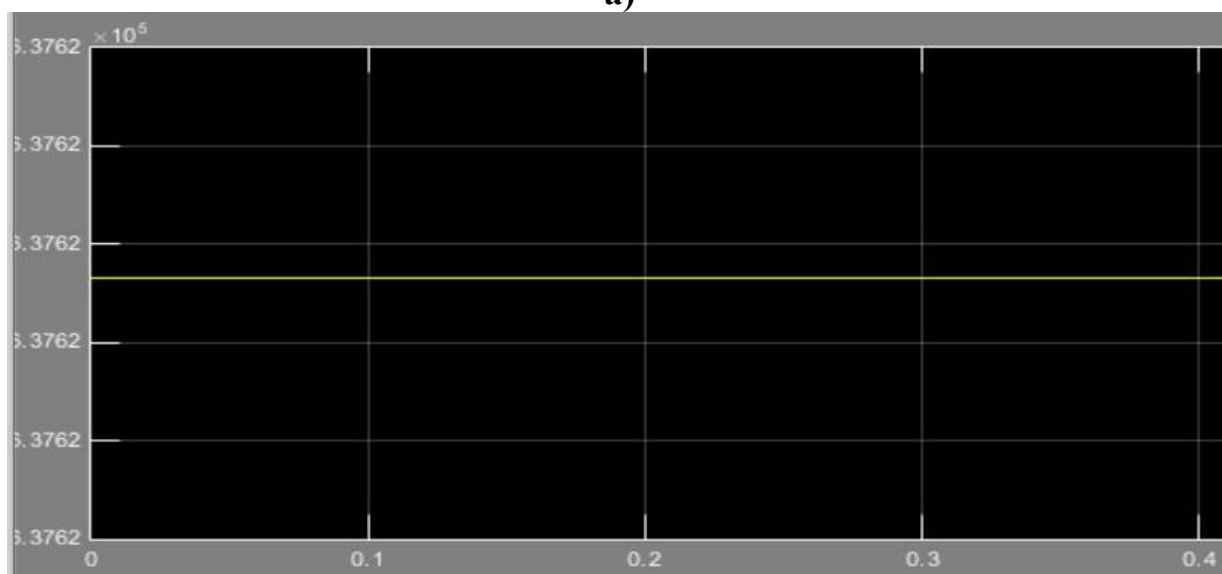


б)

**Рисунок 3.8 – Показатели значения передаваемой активной мощности:  
а) до линии электропередачи; б) после ЛЭП**



а)



б)

**Рисунок 3.9 – Показатели значения напряжения: а) до линии электропередачи; б) после ЛЭП**

### **Выводы по главе**

При моделировании передачи на переменном токе возникает резонансный эффект, который не учитывался при расчетах во второй части, из за чего расчеты и результаты моделирования не полностью соответствуют. Однако, несмотря на некоторые соответствия, передача электроэнергии на постоянном токе является более выгодным, так как при таком способе передачи меньше потерь электроэнергии, что соответствует с выводами расчетов. При передаче на переменном токе, в частности из за резонансного эффекта потери составляют 470 МВт, значение перенапряжения 118 кВ. При передаче на постоянном токе потери составляют 149 МВт, падение напряжения составило 113 кВ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итоги проделанной работы мы видим что в зависимости от протяженности и значения передаваемой мощности можно применять разные технологии электропередачи.

В первой части работы приведен обзор существующим технологиям электропередачи и их сравнительный анализ. В результате анализа было заключено что на дальние расстояния по разным критериям целесообразны 2 технологии: высоковольтные ЛЭП переменного тока и высоковольтные ЛЭП постоянного тока.

Во второй части были сделаны расчеты двух вышеперечисленных технологий электропередачи. За основу протяженности и передаваемой мощности были взяты данные существующих ЛЭП, по которым передается электроэнергия с Севера Казахстана в дефицитные районы Южного Казахстана.

В третьей части на основе расчетов предыдущей части были созданы имитационные модели двух технологий электропередачи в программной среде Matlab.



## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Trieb F. Trans-Mediterranean interconnection for concentrating solar power. TRANS-CSP Report 2006.
2. A. Kalair, N. Abas, N. Khan, Comparative study of HVAC and HVDC transmission systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 59 (2016).
3. Zhou Li, Ruopei Zhan, Yazhou Li, Yan He, Jinming Hou, Xiaoling Zhao, Xiao-Ping Zhang, Recent developments in HVDC transmission systems to support renewable energy integration, *Global Energy Interconnection*, Volume 1 Number 5 December 2018 (595-607).
4. Abu-Elanien AEB (2018) Protection of star connected multiterminal HVDC systems with offshore wind farms. IEEE, International Conference on Compatibility, IEEE 12<sup>th</sup> International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG 2018), Doha, Qatar, 10-12 April 2018.
5. Gowaid IA, Page F, Adam GP et al (2015) Ring DC node configurations for enhanced DC fault protection in multiterminal HVDC networks. International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), Palermo, Italy, 22-25 Nov. 2015.
6. Sawsan Sayed, Ahmed Massoud, Minimum transmission power loss in multi-terminal HVDC systems: A general methodology for radial and mesh networks, *Alexandria Engineering Journal*, accepted 11 December 2018.
7. Christof Humpert, Long distance transmission systems for the future electricity supply - Analysis of possibilities and restrictions, *Energy* 48 (2012) 278-283.
8. ABB AB Grid Systems - HVDC. Caprivi link interconnector. Brochure. Available from: [www.abb.com/hvdc](http://www.abb.com/hvdc).
9. K.R. Padiyar, FACTS Controllers in Power Transmission and Distribution.
10. Guadalupe Arcia-Garibaldi, Pedro Cruz-Romero, Antonio Gómez-Expósito, Future power transmission: Visions, technologies and challenges, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 94 (2018) 285–301.
11. Зеленохат Н.И., Интеллектуализация ЕЭС Росси: инновационные предложения, Издательский дом МЭИ, 2013.
12. Jody Verboomen, Dirk Van Hertem, Pieter H. Schavemaker, Wil L. Kling, Ronnie Belmans, Phase Shifting Transformers: Principles and Applications, Conference: Future Power Systems, 2005 International Conference.
13. K. WANG, M. L. CROW, Modern flexible AC transmission system (FACTS) devices, Woodhead Publishing Series in Energy 2013, Pages 174-205.
14. El-Moursi, M. S. and Sharaf, A. M., Novel controllers for the 48-pulse VSC STATCOM and SSSC for voltage regulation and reactive power compensation, *IEEE Transactions on Power Systems*, 2005.
15. Edson H. Watanabe, Francisco K. de Araújo Lima, Robson F. da Silva Dias, Maurício Aredes, Pedro G. Barbosa, Silvangela L.S. Lima Barcelos, Gilson Santos

Jr., Flexible AC Transmission Systems, Power Electronics Handbook (Fourth Edition), 2018, Pages 885-909.

16. Бушуев В.В., Зильберман С.М., Самородов Г.И., Полуволновые электропередачи для транспорта электроэнергии на сверхдальние расстояния 2-4 тыс.км, Журнал Энергия Единой Сети.

17. Зильберман С.М., Самородов Г.И., Оценка эффективности применения полуволновой передачи электроэнергии в Южной Африке, Журнал Известия Российской Академии Наук .

18. Yutian Liu, Hao Tian, Zhengzhong Liu, Xiaohui Qin, Aspects of ultra-high voltage half-wavelength power transmission technology, Global Energy Interconnection Vol. 1 No. 1 Jan. 2018.

19. Javier Santiago, Maria Cristina Tavares, Analysis of half-wavelength transmission line under critical balanced faults: Voltage response and overvoltage mitigation procedure, Electric Power Systems Research 166 (2019).

20. И. И. Алиев, Энергосберегающая однопроводная ЛЭП, Журнал Энергобезопасность и Энергосбережение, 2011.

21. Стребков Д.С., Некрасов А.И., Резонансные методы передачи энергии, Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства, 2006, 33-40 стр.

22. Сытников В.И., Сверхпроводящие кабельные линии: состояние вопроса и перспективы, Журнал Академия Энергетики, 2011, 74-83 стр.

23. S. Mukoyama , M. Yagi , N. Fujiwara , H. Ichikawa, Conceptual design of 275 kV class high-Tc superconducting cable, Physica C 470 (2010).

24. Roberto Rudervall, J.P. Charpentier, Raghuvver Sharma, High Voltage Direct Current (HVDC)Transmission Systems Technology Review Paper, Energy Week 2000, Washington, D.C, 2000.

25. Шклярский Я.Э., Соловьев С.В., Сравнение эффективности передачи электроэнергии на примере ЛЭП постоянного и переменного тока, Технические науки, 2016.

26. Электронный ресурс [<https://kegoc.kz/ru/o-kompanii/investicionnye-proekty/proekt-stroitelstvo-vtoroy-linii-elektroperedachi-500-kv-tranzita>]

27. Неклепаев Б. Н. «Электрическая часть станций и подстанций. Справочные материалы», М.: Энергоатомиздат, 1989 г.

28. Проектирование электрических сетей : учеб. пособие / С.С. Ананичева, Е.Н. Котова.— Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2017. — 164 с.

29. В.И. Идельчик Электрические сети и системы. М.: Энергоатомиздат, 1989

30. Aytug Font, Suat Ihan, Hasbi Ismailoglu, Fermin Espino Cortes, Aydogan Ozdemir, Design and Technical Analysis of 500-600 kV HVDC Transmission System for Turkey, 2017 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)

31. Закарюкин В.П. Техника высоких напряжений: Конспект лекций. – Иркутск: ИрГУПС, 2005. – 137 с.