

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет»
(национальный исследовательский университет)
Политехнический институт
Факультет Энергетический
Кафедра «Электрические станции, сети и системы электроснабжения»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА

Рецензент, должность

_____/_____
« ____ » _____ 20__ г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой, д.т.н., профессор

_____/ И.М. Кирпичникова /
« ____ » _____ 20__ г.

(наименование темы работы)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
ЮУрГУ – 13.03.02. 2017. 13-185-1413. ВКР
(код направления, год, номер студенческого)

Консультант, должность

_____/_____
« ____ » _____ 2017 г.

Руководитель, должность

_____/ М.Е. Гольдштейн /
« ____ » _____ 2017 г.

Консультант, должность

_____/_____
« ____ » _____ 2017 г.

Автор

студент группы П – 471
_____/ М.В. Точилкин /
« ____ » _____ 2017 г.

Консультант, должность

_____/_____
« ____ » _____ 2017 г.

Нормоконтролер, должность

_____/ М.Е. Гольдштейн /
« ____ » _____ 2017 г.

Челябинск 2017

АННОТАЦИЯ

Точилкин М.В. «Длительный режим района электрической сети содержащей малогабаритные устройства продольной компенсации», – Челябинск: ЮУрГУ, П – 471, 75 с., 12 табл., 52 рис., библиогр. список – 15 наим., 2 прил.

Выпускная квалификационная работа выполнена с целью демонстрации качества полученных знаний и умений, практического опыта, структурирования и применения профессиональных навыков.

Во введении указана актуальность выбранной темы, показано на сколько востребовано использование данной технологии, обозначены объект, предмет исследования, а также задачи. В первой и второй части работы представлен обзор основных устройств, с помощью которых можно осуществлять регулирование режима сети, разобрано развитие устройств продольной компенсации, проведен обзор малогабаритных устройств продольной компенсации.. В третьей части работы проведён анализ длительных режимов работы сети, осуществлено регулирование режима с помощью устройств продольной компенсации. На основе выполненной работы сделаны выводы, в библиографическом списке указан перечень литературы, использованной для написания курсовой работы, в приложении А – сокращения использовавшиеся в ходе работы, в приложении Б – дополнительный материал использовавшийся в презентации.

					<i>13.03.02.2017.185.00 ПЗ</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>	<i>Точилкин М.В.</i>				<i>Длительный режим района электрической сети содержащей малогабаритные устройства продольной компенсации</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>	<i>Гольдштейн М.Е.</i>					4	75	
<i>Реценз.</i>						<i>ЮУрГУ Кафедра ЭССиСЭ</i>		
<i>Н. Контр.</i>	<i>Гольдштейн М.Е.</i>							
<i>Утверд.</i>	<i>Кирпичникова</i>							

ОГЛАВЛЕНИЕ:

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ УСТРОЙСТВАХ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ	9
1.1 Способы управлением передаваемой мощности по линии.....	9
1.2 Основные требования к устройствам преобразования параметров электроэнергии, применяемым в электроэнергетике.....	11
2 ЭЛЕМЕНТЫ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ.....	13
2.1 Автономный инвертор напряжения.....	13
2.2 Преобразователь напряжения.....	26
2.3 ПН в режиме СТАТКОМ	32
2.4 Устройства продольной компенсации.....	39
2.5 Использование МУПК для регулирования режима работы сети	44
2.6 Принцип действия и устройство МУПК	45
3 РЕГУЛИРОВАНИЕ РЕЖИМА СЕТИ	51
3.1 Анализ длительного режима района электрической сети	51
3.2 Установка МУПК в ЛЭП	63
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	68
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	69
ПРИЛОЖЕНИЕ А СОКРАЩЕНИЯ	71
ПРИЛОЖЕНИЕ Б МАТЕРИАЛ ИЗ ПРЕЗЕНТАЦИИ	72

										Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						5

13.03.02.2017.185.00 ПЗ

ВВЕДЕНИЕ

Электроэнергетическая система – это единый технологический комплекс систем генерации электроэнергии и электрических сетей: системообразующих – магистральных, а также распределительных (приближенных к потребителям). Управление комплексом осуществляют интегрированные в него локальные и централизованные средства релейной защиты и автоматики. В нормальных режимах это технологическая автоматика, а в аварийных – релейная защита и противоаварийная автоматика. В XX веке рост эффективности электроэнергетики достигался, в основном, за счет освоения оборудования больших мощностей и высоких напряжений. Внедрение более прогрессивных технологий управления генерацией и передачей электроэнергии в рабочих, аварийных и послеаварийных режимах энергосистем тормозилось отсутствием достаточно экономичной и надежной элементной базы для систем регулирования.

Но уже в конце XX века появились быстродействующие высоконадежные силовые устройства управления режимами энергосистемы на базе новых силовых полностью управляемых полупроводниковых приборов, начала расти наблюдаемость состояния энергосистем за счет освоения оптоволоконных линий связи, началось применение контроллеров, что резко увеличило надежность систем управления в целом. [10]

В конце 50-х годов XX столетия появились первые полупроводниковые диодные, а через десятилетие и первые тиристорные системы возбуждения синхронных генераторов. Аналогичным образом развивались передачи постоянного тока на базе ионных и тиристорных преобразователей.

Интенсивное строительство линий электропередачи в развитых странах во второй половине XX в. привело к тому, что сооружение новых линий стало весьма затруднительным, главным образом из-за проблем, связанных с отводом земли. Образовались неоднородные сложно замкнутые сети из линий различных классов напряжения, в которых линии более низких классов напряжения

								13.03.02.2017.185.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					6

оказались перегруженными, в то время как линии СВН недогруженными. Причина этого — отсутствие средств принудительного распределения потоков мощности в сложной неоднородной сети.

Актуальность проблемы: продолжающийся рост нагрузки требует увеличения пропускной способности существующих линий электропередачи и управления их режимами в целях оптимального распределения потоков мощности между ними. Возможны режимы, когда требуется принудительное распределение мощности между отдельными линиями. Поэтому в последние годы интенсивно обсуждаются возможные пути решения этой задачи.

В настоящее время разработан ряд устройств, позволяющих управлять потоками мощности по линиям переменного тока, причем выполнять это практически безинерционно. Линии, оснащенные такими устройствами, получили название управляемых, или гибких, линий.

Гибкие линии позволяют:

- обеспечить оптимальное распределение мощности между линиями в сложной неоднородной электрической сети в соответствии с требованиями диспетчера;
- повысить устойчивость системы путем демпфирования колебаний, возникающих в переходных электромеханических процессах;
- повысить пропускную способность линий электропередачи на стадии их проектирования;
- повысить пропускную способность существующих линий в тяжелых послеаварийных режимах вплоть до теплового предела по нагреву проводов (для относительно коротких линий).

В данной работе проекте рассматриваются устройства с помощью которых можно регулировать режим работы электрической сети и их применение при послеаварийном режиме сети.

Объект исследования: длительный режим района электрической сети.

Предмет исследования: регулирование режима электрической сети с помощью устройства на базе преобразователя напряжения.

					<i>13.03.02.2017.185.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						7
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

Задачи:

1. Выполнить обзор устройств, с помощью которых возможно регулирование режима сети.
2. Рассмотреть развитие устройств продольной компенсации - малогабаритное устройство продольной компенсации.
3. Анализировать длительные режимы работы сети.
4. Провести регулирование режима работы сети с помощью устройств продольной компенсации.

					13.03.02.2017.185.00 ПЗ	Лист
						8
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ УСТРОЙСТВАХ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

1.1 Способы управления передаваемой мощностью по линии

Следует отметить, что начало работ в этом направлении было положено еще в 60-х годах XX в., когда в ряде стран, в том числе и нашей, были развернуты исследования по статическим источникам реактивной мощности, обладающим высоким быстродействием. Эти устройства позволяли стабилизировать напряжение в отдельных узлах электрической сети и тем самым способствовать повышению пропускной способности линий электропередачи и устойчивости систем. Были исследованы различные типы таких устройств и созданы опытно-промышленные образцы некоторых из них.

Однако широкому внедрению этих устройств в то время препятствовало отсутствие необходимой элементной базы полупроводниковой техники: силовых электронных ключей (запираемых тиристоров и силовых транзисторов), которые могли бы открываться и закрываться по данной извне команде. [8]

В настоящее время в связи с развитием силовой электроники такие полупроводниковые приборы разработаны и имеют достаточно высокие параметры. Это позволяет создать устройства, которые могут применяться для решения многих задач современной электроэнергетики.

Активная мощность, передающаяся по линии переменного тока, в самом упрощенном виде определяется выражением для некомпенсированной линии:

$$P = \frac{U_1 \cdot U_2}{X_L} \cdot \sin \delta \quad (1)$$

Где U_1 и U_2 — напряжения по концам линии, или точнее, в тех узлах сети, к которым она подключена; x_L — реактивное сопротивление линии; δ — фазовый угол сдвига между напряжениями U_1 и U_2 .

На рисунке 1 и на рисунке 2 приведены векторная диаграмма и характеристика линии. Здесь же пунктиром показана характеристика линии

									Лист
									9
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

13.03.02.2017.185.00 ПЗ

большей длины, из которой видно, что максимальная мощность, которая может быть передана по такой линии, уменьшается. На рисунке также указаны величины P_0 и δ_0 — мощность и угол исходного режима.

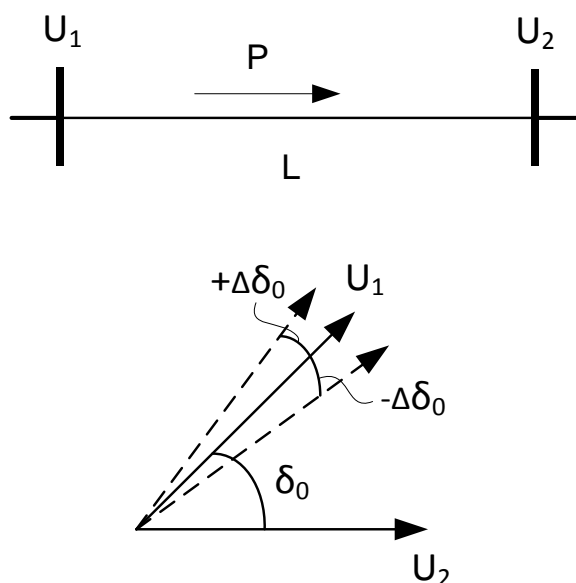


Рисунок 1 – Линия и её векторная диаграмма

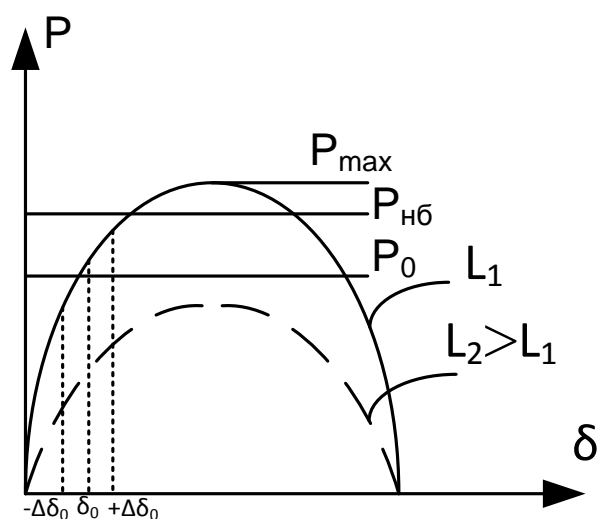


Рисунок 2 – Зависимость мощности P , передаваемой по линии, от угла δ

Из выражения (1) следует, что управление передаваемой по линии мощностью может осуществляться следующими путями:

- изменением в допустимых пределах и стабилизацией на заданном уровне напряжений в узлах сложной сети, к которым подсоединена линия, или в промежуточных точках последней;

- изменением угла δ фазового сдвига между напряжениями по концам линии;
- изменением реактивного сопротивления линии;
- комбинацией этих способов.

В соответствии с этим к устройствам, способным управлять мощностью и пропускной способностью линий переменного тока, могут быть отнесены устройства, способные выполнять следующие функции:

- регулировать и стабилизировать напряжение;
- изменять угол фазового сдвига;
- изменять реактивное сопротивление линии;
- осуществлять комбинированное воздействие на линию.

1.2 Основные требования к устройствам преобразования параметров электроэнергии, применяемым в электроэнергетике

Оборудование, применяемое в электроэнергетике, должно соответствовать технологическому процессу, которое оно реализует. В частности оно должно иметь достаточное быстродействие при регулировании, то есть не должно снижать быстродействие системы в целом. [11]

В связи с тем, что электроэнергетика работает с огромными потоками энергии, любые отказы приводят к существенным ущербам как в самой энергетике, так и у потребителей электроэнергии.

Даже небольшое снижение КПД оборудования в электроэнергетике приводит к значительным потерям электроэнергии.

Поэтому главными требованиями, предъявляемыми к оборудованию, применяемому в электроэнергетике являются следующие:

- высокая надежность,
- высокий КПД,

									Лист
									11
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

13.03.02.2017.185.00 ПЗ

- высокое быстродействие.

Сегодня эффективными устройствами регулирования напряжения в узлах и потоков мощности в линиях являются элементы «гибкого» – адаптивного управления, отвечающие всем требованиям, которые включают ряд современных высокотехнологичных решений на базе силовой электроники, улучшающих качество работы, надежность, мощность и гибкость систем передачи электроэнергии.

					13.03.02.2017.185.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		12

2 ЭЛЕМЕНТЫ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

2.1 Автономный инвертор напряжения

Автономные инверторы — устройства, преобразующие постоянный ток в переменный с неизменной или регулируемой частотой и работающие на автономную (не связанную с сетью переменного тока) нагрузку. В этом главное отличие автономных инверторов от ведомых инверторов, также преобразующих постоянный ток в переменный, но работающих на сеть переменного тока. Нагрузкой автономного инвертора может быть единичный потребитель (асинхронный двигатель, электрическая установка) или разветвленная сеть потребителей (несколько нагрузок, работающих по своему графику).

Основой автономного инвертора является вентильное переключающее устройство, которое может выполняться по однофазным и трехфазным схемам (с нулевым выводом или мостовым). Для того что бы понять принцип действия рассмотрим модель однофазного автономного инвертора.

Переменное напряжение на нагрузке формируется путем кратковременных чередующихся подключений источника питания постоянного напряжения к противоположным клеммам нагрузки, то есть в один момент времени источник питания своими клеммами 1-2 подключен к клеммам нагрузки 3-4, а в следующий – к клеммам 4-3 (рисунок 3). В результате чего ток через нагрузку сначала протекает в одном направлении, а затем – в другом. С повышением частоты таких переключений возрастает частота переменного тока на нагрузке.

									Лист
									13
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2017.185.00 ПЗ				

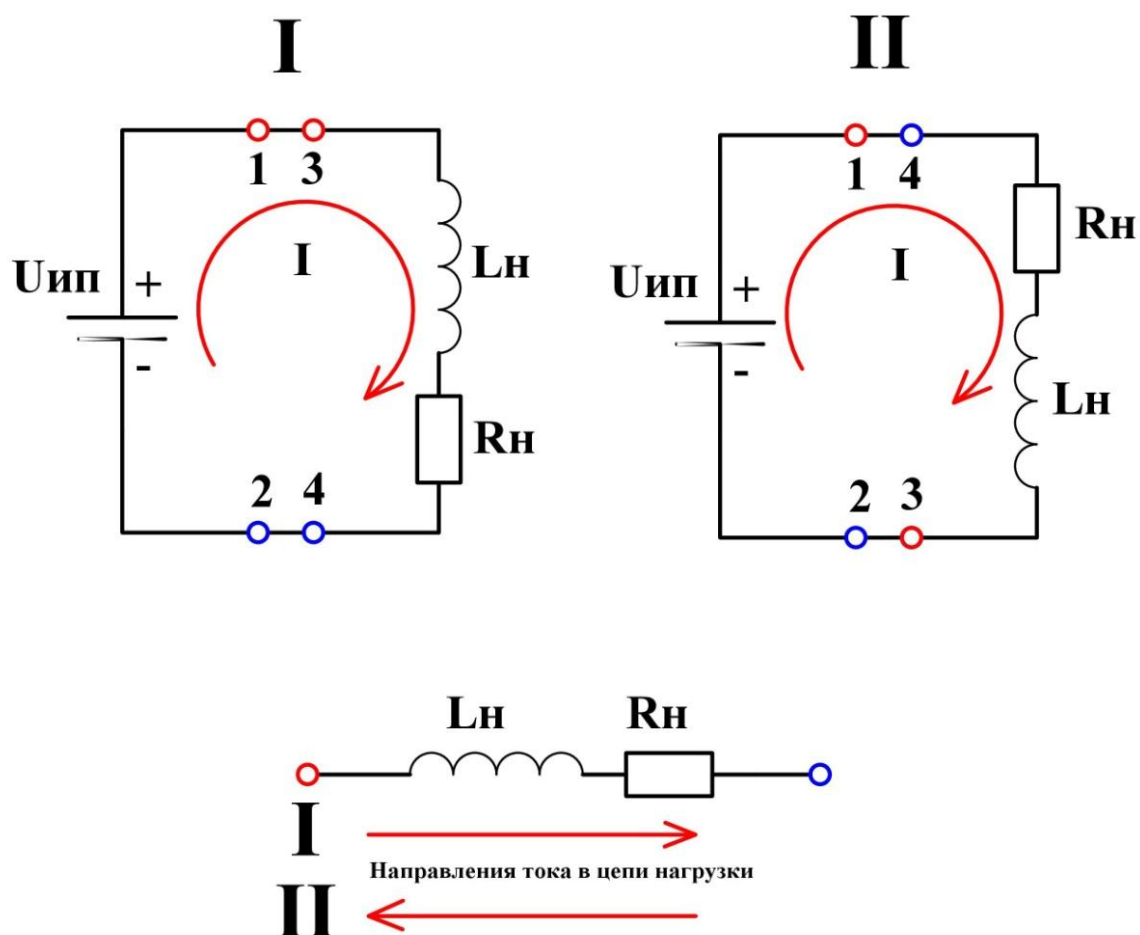


Рисунок 3 – Автономный инвертор напряжения, принцип действия

Еще проще понять процесс формирования переменного напряжения из постоянного можно если представить, что в одной руке находится резистор, а в другой батарейка. При этом резистор все время находится в одном фиксированном положении, а батарейка подключается то плюсом, то минусом к одному и тому же выводу резистора. Таким образом ток через резистор будет протекать то в одном, то в противоположном направлении. В действительности роль переключателей выполняют полупроводниковые ключи.

Принципиальная схема автономного инвертора напряжения показана на рисунке 4.

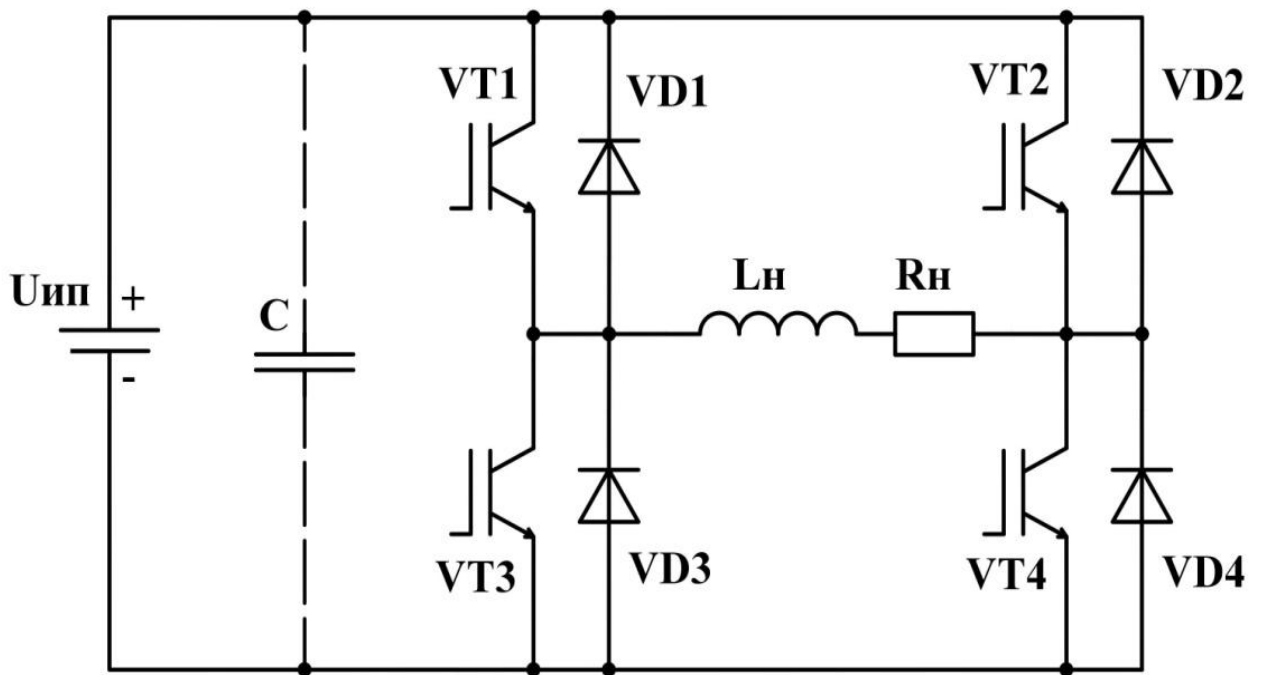


Рисунок 4 – Автономный инвертор напряжения, принципиальная схема

Рассмотрим работу инвертора на примере активно-индуктивной нагрузки, как наиболее распространённой.

В некоторый момент времени t_1 (рисунок 5) одна пара диагонально противоположных транзисторов VT1, VT4 открыта, а вторая VT2, VT3 закрыта. Ток, протекающий через инвертор напряжения и нагрузку, нарастает по экспоненциальному закону с постоянной времени $\tau=L_Н/R_Н$ по пути «+» $U_{ИП}$ – VT1 – $L_НR_Н$ – VT4 – «-» $U_{ИП}$. В следующий момент t_2 (рисунок 6) транзисторы VT1, VT4 закрыты, а VT2, VT3 открыты.

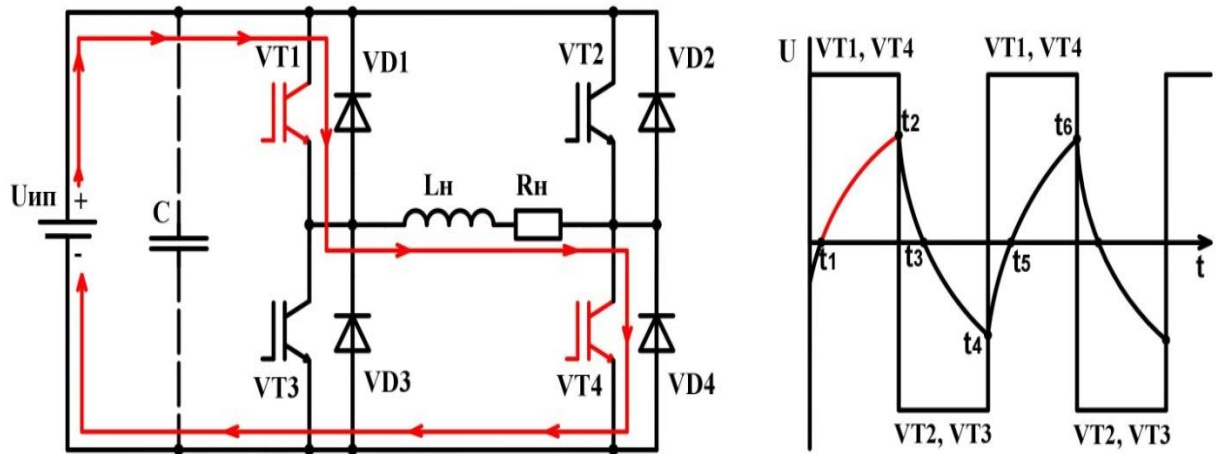


Рисунок 5 – Путь протекания тока через элементы инвертора на интервале времени t_1-t_2

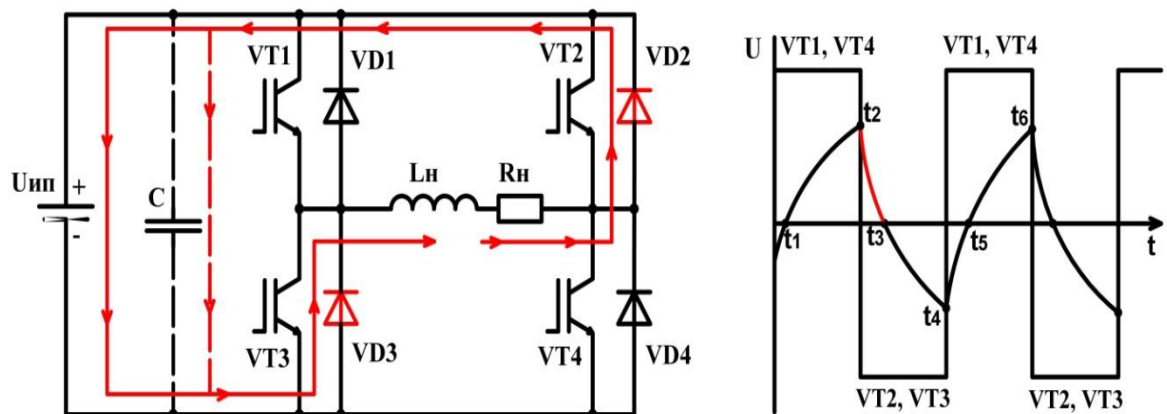


Рисунок 6 – Путь протекания тока через элементы инвертора на интервале времени t_2-t_3

Однако из-за наличия индуктивности L_H ток не может мгновенно изменить свое направление. Поэтому в момент t_2 закрытия транзисторов $VT1, VT4$ и открытия $VT2, VT3$ ток продолжает протекать через инвертор в том же направлении до тех пор, пока запасенная в индуктивности энергия магнитного поля $W_{LH} = L_H I^2 / 2$ не снизится до нуля (промежуток времени t_2-t_3) (рисунок 6). Поскольку транзисторы $VT1, VT4$ уже закрыты, то ток будет протекать по такой

цепи: $L_H R_H - VD2 - U_{ИП} - VD3$. На протяжении этого интервала времени энергия с нагрузки отдается источнику питания $U_{ИП}$.

В момент t_3 (рисунок 7) ток снизится до нуля, после чего изменится его направление. В промежутке времени $t_3 < t < t_4$ ток будет нарастать, протекая по пути: «+» $U_{ИП} - VT2 - L_H R_H - VT3 - \leftarrow$ $U_{ИП}$. В момент времени t_4 (рисунок 8) транзисторы $VT2, VT3$ снова закроются, $VT1, VT4$ откроются. Ток на отрезке времени $t_4 < t < t_5$ останется протекать в прежнем направлении, пока не снизится до нуля. Путь прохождения тока: $L_H R_H - VD1 - U_{ИП} - VD4$.

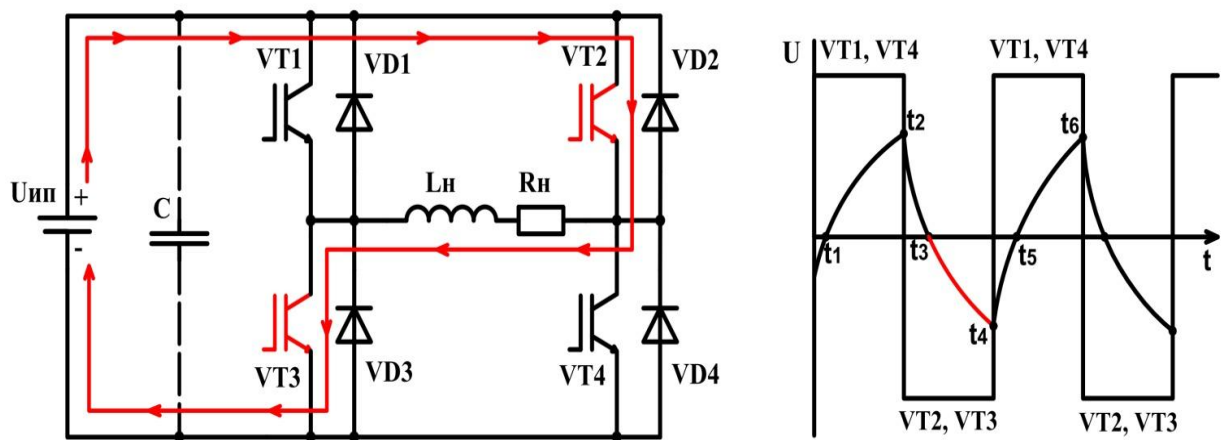


Рисунок 7 – Путь протекания тока через элементы инвертора на интервале времени t_3-t_4

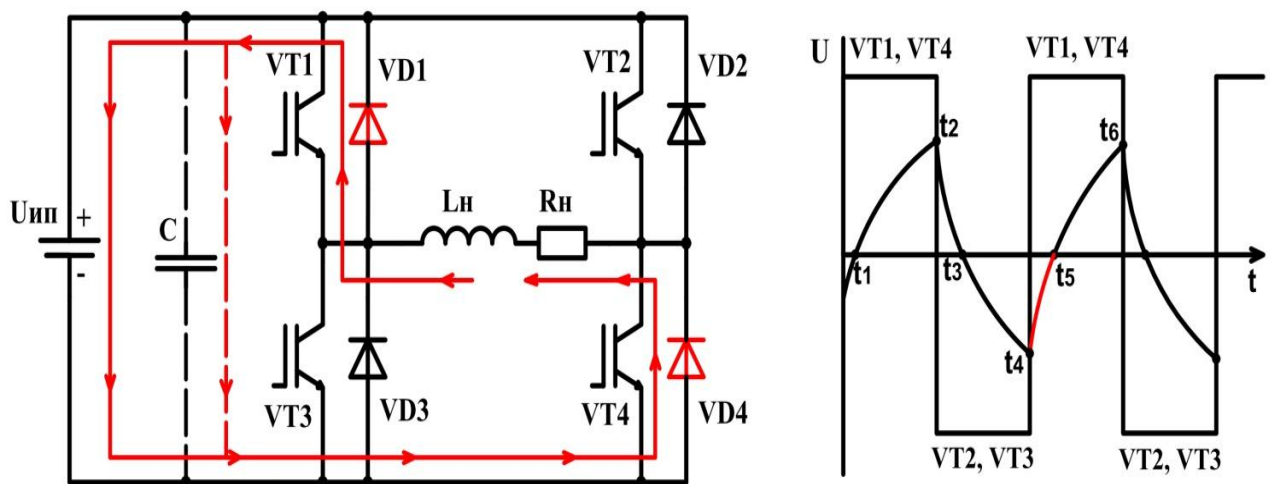


Рисунок 8 – Путь протекания тока через элементы инвертора на интервале времени t_4-t_5

В следующий момент времени t_5 ток станет равным нулю, а затем, изменив свое направление, начнет возрастать в промежутке времени $t_5 < t < t_6$. В момент t_6 снова произойдет переключение транзисторов и процессы повторятся.

Ток протекает по цепи «+» $U_{ИП} - VT_2 - R_H L_H - VT_3 -$ «-» $U_{ИП}$. Таким образом транзисторы $VT_1...VT_4$ попеременно подключают источник питания $U_{ИП}$ к клеммам нагрузки: сначала плюс $U_{ИП}$ подключен к 3-й клемме, а минус к 4-й клемме, затем наоборот.

Рассмотренный выше алгоритм управления транзисторами позволяет сохранять величину выходного напряжения инвертора и соответственно тока нагрузки постоянными, однако в большинстве случаев необходимо изменять напряжения с целью получения требуемой величины тока в нагрузке.

Существуют два способа регулирования выходного напряжения инвертора:

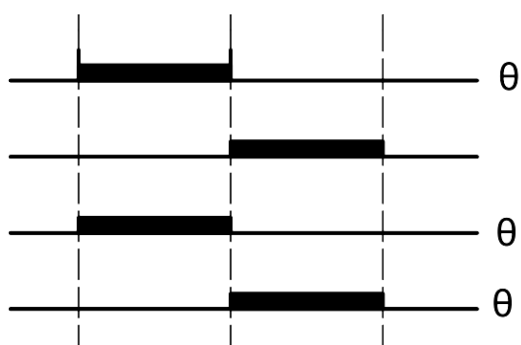
1) первым способом является изменение величины напряжения источника питания $U_{ИП}$;

2) второй способ реализуется с помощью так называемых внутренних средств инвертора, а именно за счет изменения формы выходного напряжения.

Первый способ достаточно прост и требует всего лишь регулируемого источника питания. Суть второго способа заключается в следующем. Для изменения напряжения на выходе инвертора необходимо сдвинуть управляющие импульсы, подаваемые на базы транзисторов VT_2 и VT_4 , относительно управляющих импульсов на VT_1 и VT_3 на угол управления α (рисунок 9).

									Лист
									18
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2017.185.00 ПЗ				

Алгоритм управления транзисторами
при постоянном значении выходного напряжения



Алгоритм управления транзисторами
при регулировании величины выходного напряжения

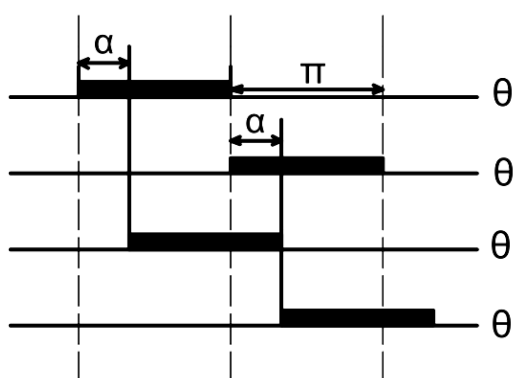


Рисунок 9 – Алгоритмы управления транзисторами однофазного инвертора
напряжения

Рассмотрим работу инвертора на при регулировании величины выходного напряжения.

На интервале времени $t_1 < t < t_2$ (рисунок 10) открыты транзисторы VT1 и VT4 напряжение на нагрузке равно источнику питания $u_n = U_{ИП}$. В следующий момент t_2 закрывается VT1 и открывается VT3. В течение времени $t_2 < t < t_3$ (рисунок 11) ток протекает по цепи $R_H L_H - VT4 - VD3$ и происходит закорачивание нагрузки вследствие чего напряжение на ней равно нулю $u_n = 0$. В момент t_3 отпирающий сигнал подается на базу транзистора VT2 и снимается с базы VT4.

В результате этого к нагрузке прикладывается напряжение источника питания $u_n = -U_{ИП}$. Наличие в цепи индуктивности приводит к тому, что на интервале времени $t_3 < t < t_4$ (рисунок 12) ток через инвертор продолжает протекать в прежнем направлении: $L_H R_H - VD2 - U_{ИП} - VD3$, а после того, как спадет до нуля, он

изменит свое направление и потечет по цепи: $U_{инп} - VT2 - R_H L_H - VT3$ (рисунок 13).

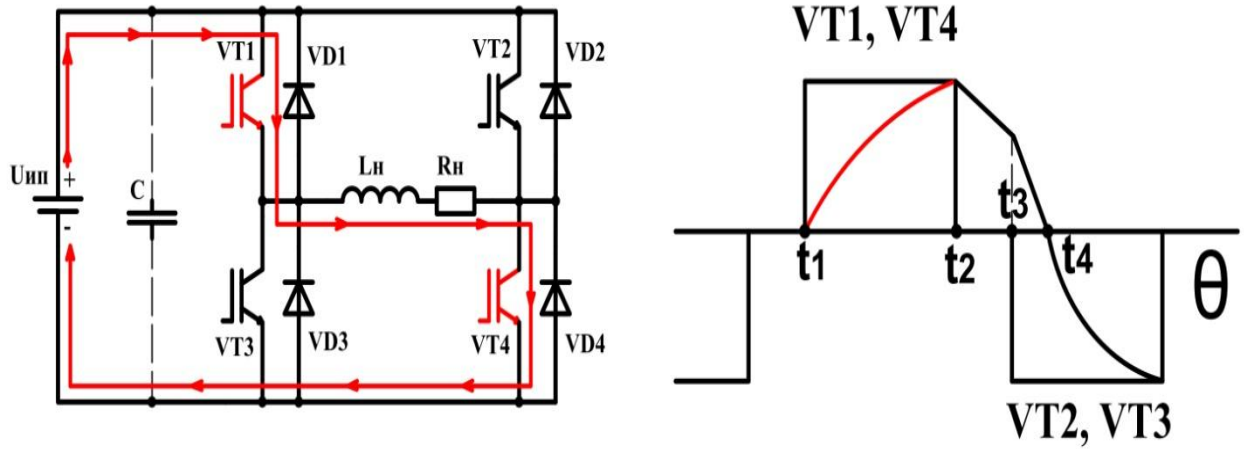


Рисунок 10 – Путь прохождения тока на интервале времени t_1-t_2

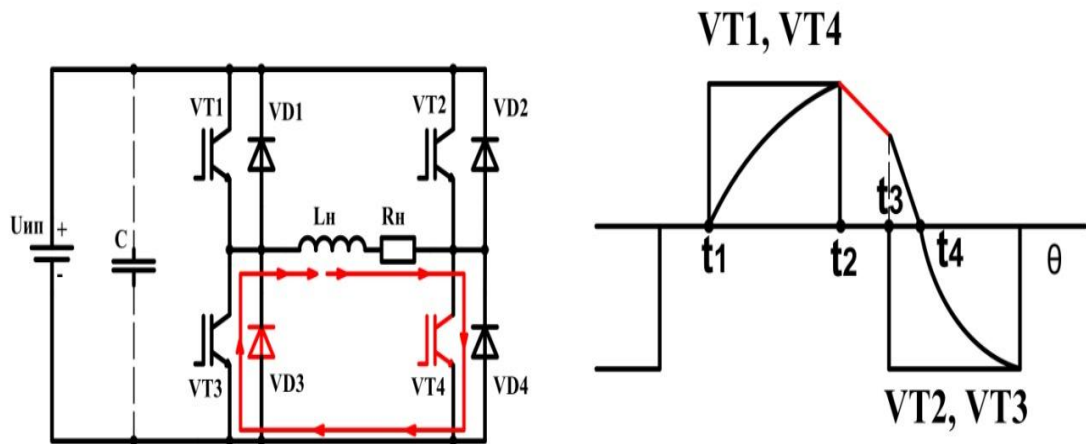


Рисунок 11 – Путь прохождения тока на интервале времени t_2-t_3

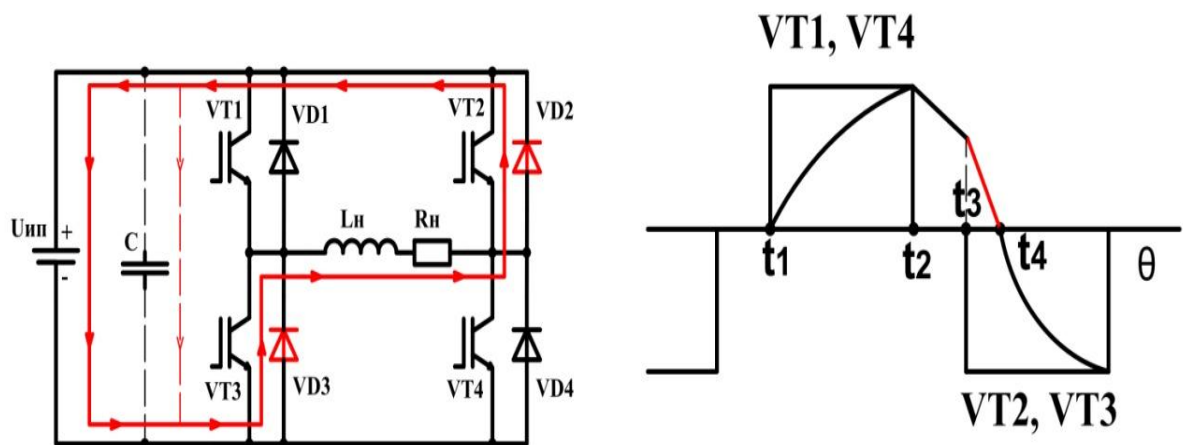


Рисунок 12 – Путь прохождения тока на интервале времени t_3-t_4

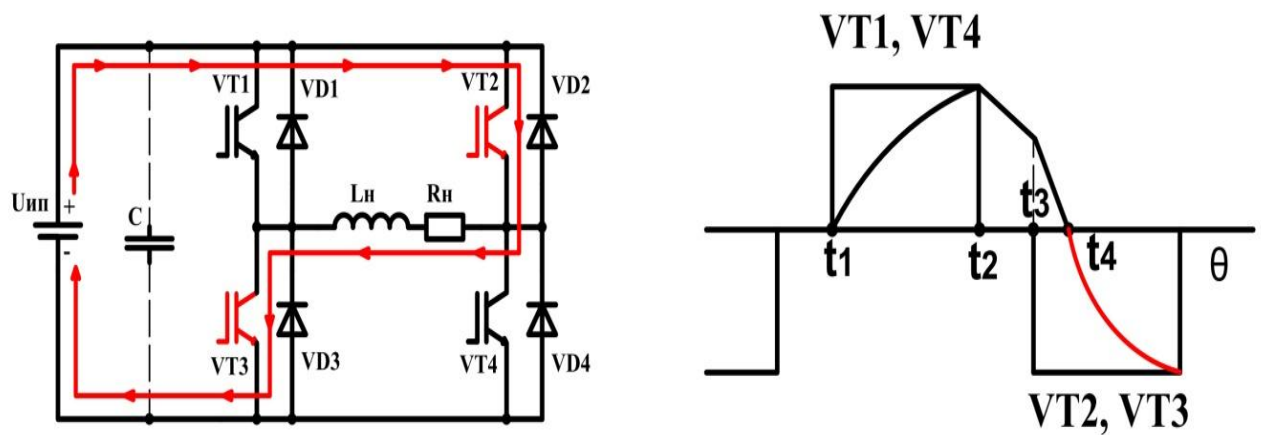


Рисунок 13 – Путь прохождения тока на интервале времени $t > t_4$

В результате применения такого алгоритма управления транзисторами в кривой напряжения возникает пауза, что влечет за собой снижение действующего значения напряжения. Следовательно, для регулирования величины напряжения на выходе инвертора необходимо изменять угол управления α .

Регулирование выходного напряжения осуществляется с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ), длительности формирующих выходное напряжение импульсов по определенному закону. Из-за наличия в схеме управляемых элементов, мы можем регулировать время подачи сигнала на транзисторы, благодаря этому в временной диаграмме напряжения возникают паузы (рисунок 14). Также вместо пауз мы можем прикладывать импульсы

противоположной полярности (рисунок 15). Таким образом мы регулируем напряжение на нагрузке.

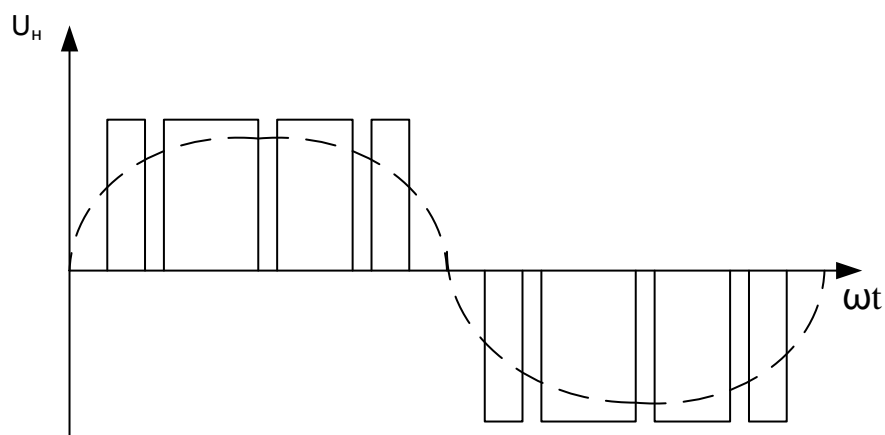


Рисунок 14 – Однополярная ШИМ

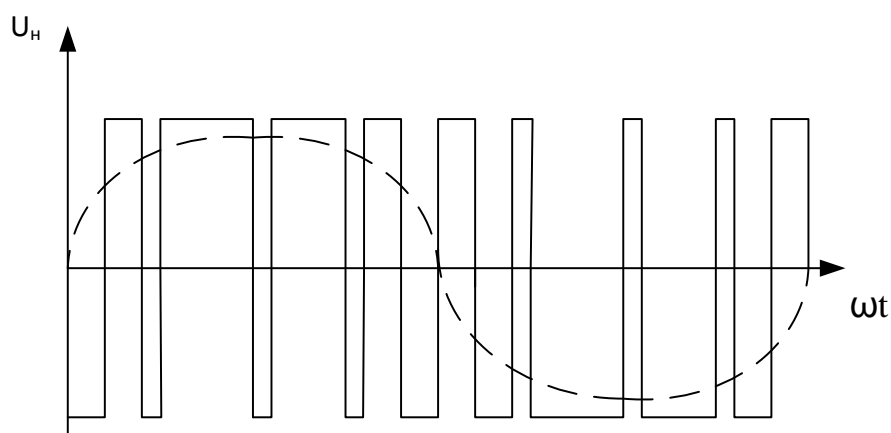


Рисунок 15 – Двуполярная ШИМ

В данной статье рассмотрен принцип работы однофазного двухуровневого инвертора напряжения, однако существуют еще многофазные и многоуровневые инверторы, но основой их работы является принцип действия рассмотренного инвертора.

Для того чтобы определить величины, которые можем регулировать с помощью автономного инвертора, построим векторную диаграмму и P-Q диаграмму.

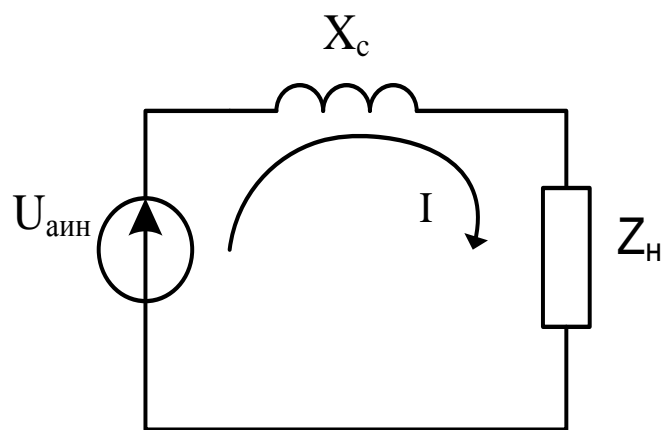


Рисунок 16 – Эквивалентная схема АИН

Из эквивалентной схемы автономного инвертора напряжения (рисунок 16) видно, что векторная диаграмма будет зависеть от характера нагрузки сети (Z_n). На рисунках 17, 18 и 19 рассмотрены все возможные случаи нагрузки сети.

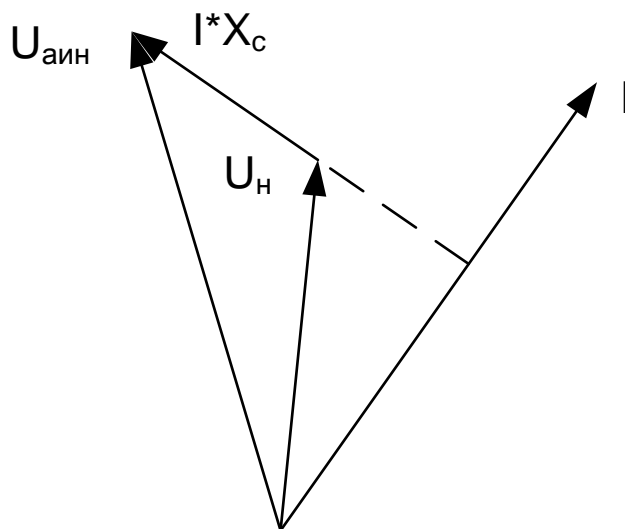


Рисунок 17 – Векторная диаграмма АИН при $Z_n = R_n + jX_n$

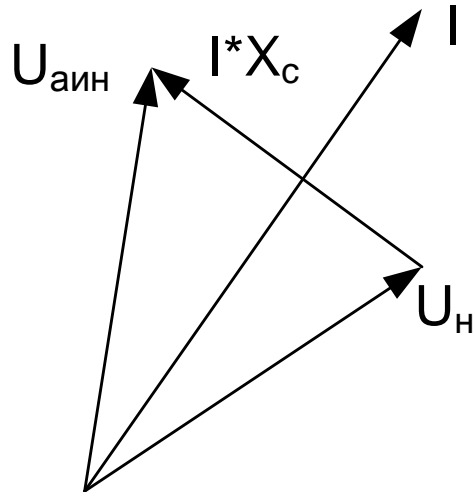


Рисунок 18 – Векторная диаграмма АИН при $Z_n = R_n - jX_n$ и $X_c > X_n$

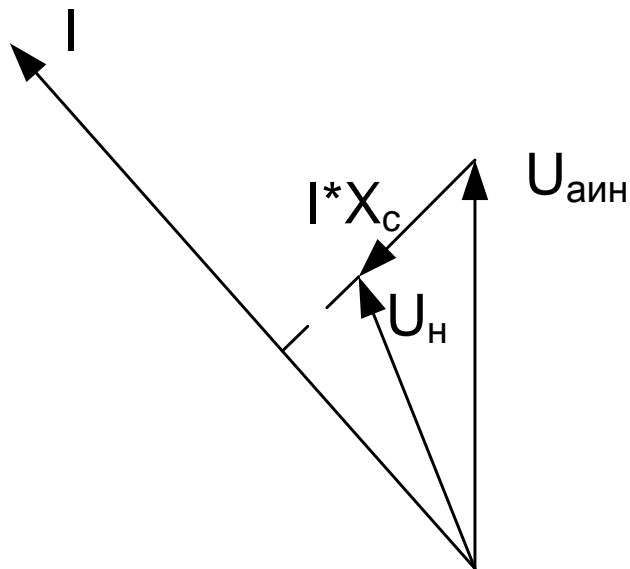


Рисунок 19 – Векторная диаграмма АИН при $Z_n = R_n - jX_n$ и $X_c < X_n$

P-Q диаграмма выглядит следующим образом:

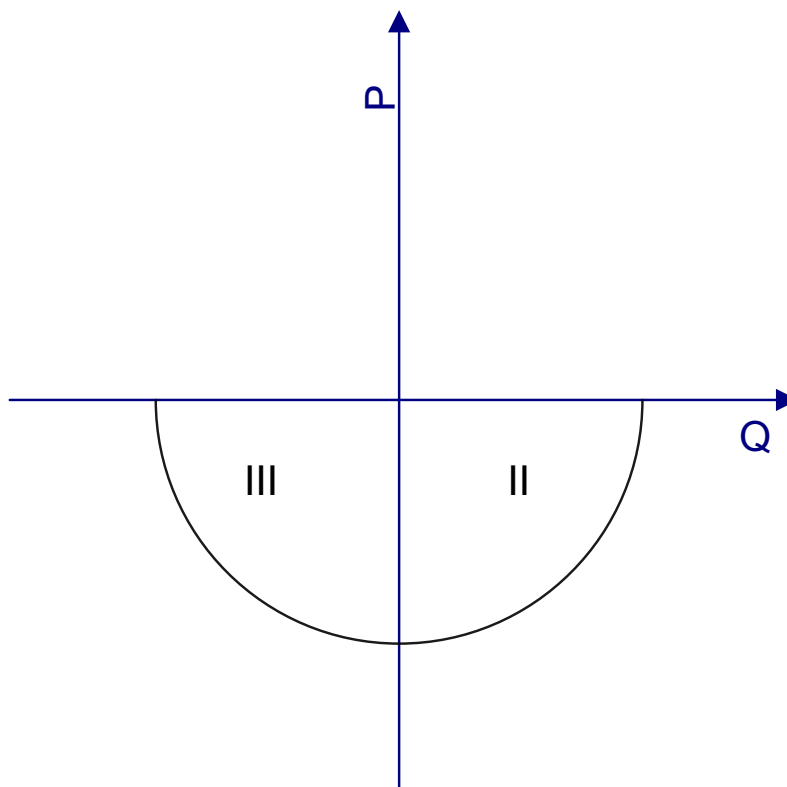


Рисунок 20 – P-Q диаграмма АИН

Таким образом, с помощью автономного инвертора мы можем работать во 2 и 3 части P-Q диаграммы, то есть выдавать активную мощность и потреблять или выдавать реактивную мощность.

Основные области применения автономных инверторов напряжения следующие:

1) питание потребителей переменного тока в устройствах, где единственным источником энергии является аккумуляторная батарея (например, бортовые вторичные источники питания)» а также резервное питание ответственных потребителей при возможном отключении сети переменного тока (электросвязь, вычислительная техника);

2) электротранспорт питающийся от контактной сети или какого-либо источника постоянного тока, где в качестве тяговых электродвигателей желательно иметь простые, надежные и дешевые короткозамкнутые асинхронные двигатели;

3) электропривод с асинхронными и синхронными двигателями, где инвертор служит источником регулируемых напряжения и частоты;

4) преобразователи постоянного напряжения одной величины в постоянное напряжение другой величины;

5) устройства для получения переменного тока необходимой частоты от источников прямого преобразования энергии (термо- и фотоэлектрические генераторы, топливные элементы, МГД- генераторы), вырабатывающих энергию на постоянном токе; [9]

В отдельных случаях к автономным инверторам предъявляется требование в отношении не только прямой передачи энергии от источника питания в нагрузку, но и обратной передачи энергии от нагрузки в источник питания, что, в частности, необходимо для реализации рекуперативного торможения асинхронных двигателей. [2]

2.2 Преобразователь напряжения

Преобразователь – это электротехническое устройство, преобразующее электроэнергию одних параметров или показателей качества в электроэнергию с другими значениями параметров или показателей качества.

Наиболее широкое распространение получили преобразователи напряжения на базе однофазной схемы, подробно рассмотрим принцип действия преобразователя на однофазной схеме.

Однофазная схема и эквивалентная схема преобразователя напряжений приведена на рисунке 21 и рисунке 22. [12]

					13.03.02.2017.185.00 ПЗ	Лист
						26
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

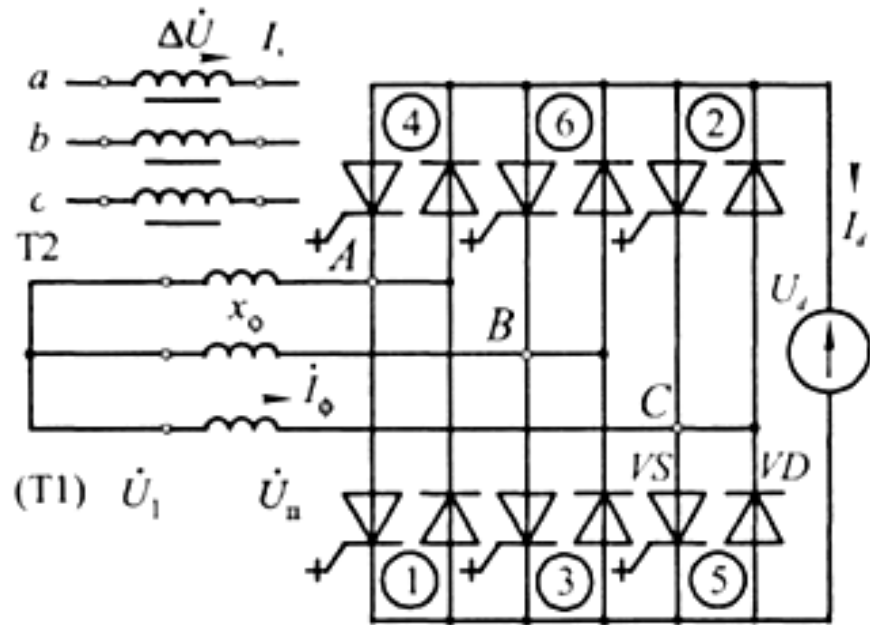


Рисунок 21 – Однофазовая схема преобразователя напряжения

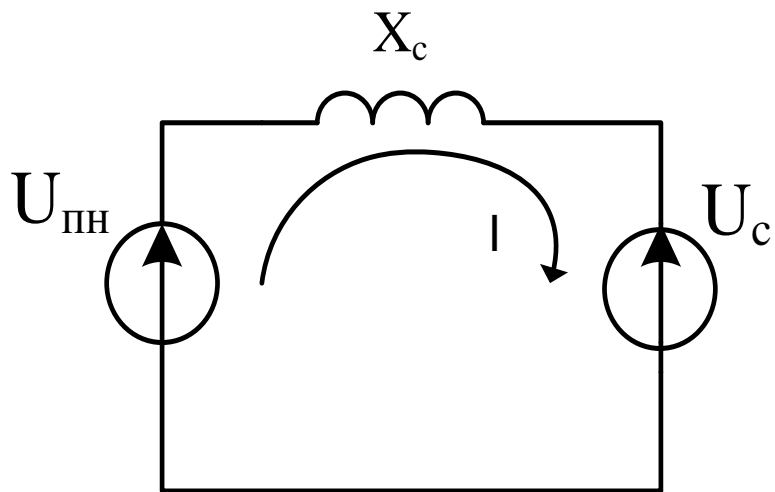


Рисунок 22 – Эквивалентная схема преобразователя напряжения

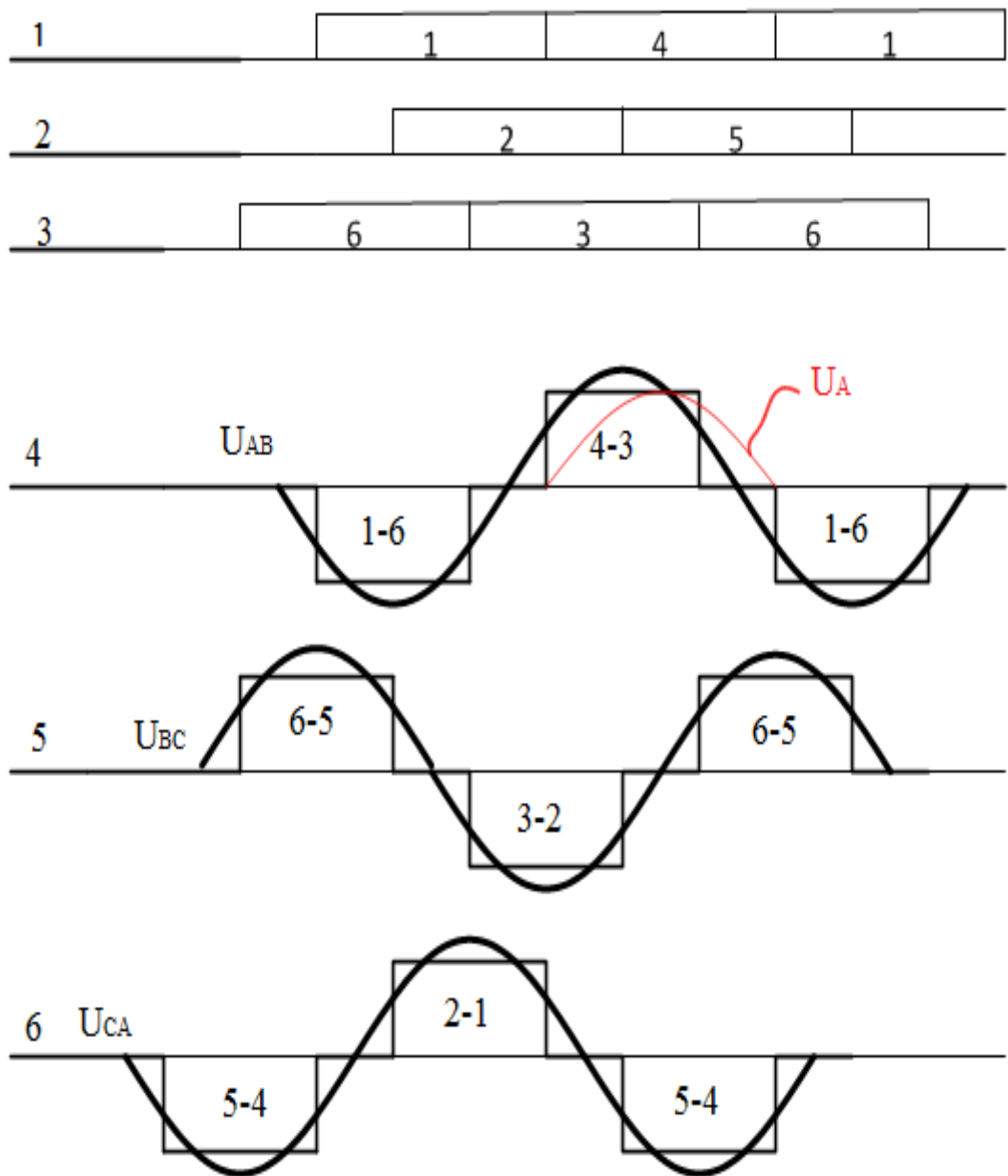


Рисунок 23 – Режим работы ПН

Принцип действия преобразователя напряжения похож на принцип действия АИН. Система управления преобразователя обеспечивает длительность проводящего состояния каждого плеча, равную 180° (оси 1,2,3 на рисунке 23) Импульсы управления поступают на запираемые тиристоры VS через 60° очередностью 1—2—3—4—5—6. При таком управлении на зажимах A,B,C формируется напряжение прямоугольной формы U_{AB} , U_{BC} и U_{CA} (оси 4,5,6 на рис. 20) первая гармоника фазного напряжения которого равна:

$$U_A = U_C = \frac{2}{\pi} \cdot U_d \quad (2)$$

где U_d — постоянное напряжение источника напряжения.

При параллельном подключении ПН через трансформатор Т1 к шинам подстанции эквивалентная схема (рисунок 22) дает возможность определить характеристики преобразователя. Изменяя угол управления (3 запираемых тиристоров и тем самым фазовое положение векторов $U_{ПН}$ по отношению к вектору U_C сети, а также значение $U_{ПН}$ за счет регулирования U_d , можно получить выпрямительный (рисунок 24), инверторный (рисунок 25) и компенсаторный режимы работы преобразователя с поворотом вектора фазного тока в диапазоне $0-360^\circ$.

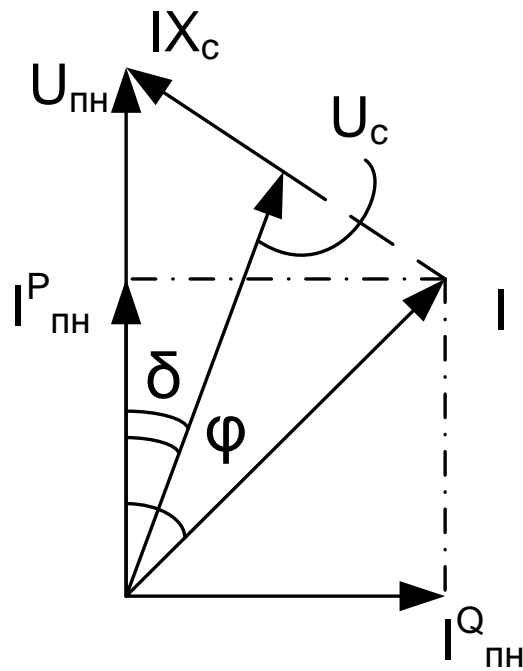


Рисунок 24 – ПН в выпрямительном режиме работы

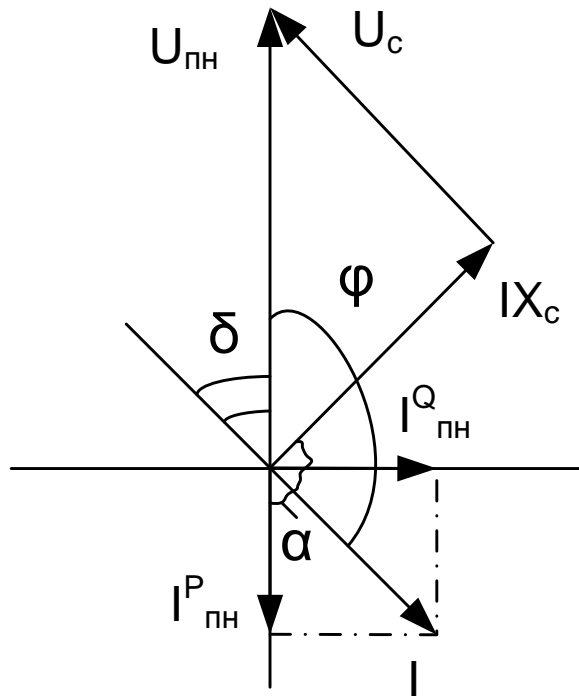


Рисунок 25 – ПН в инверторном режиме работы

При этом основные соотношения, определяющие режим работы ПН, имеют вид:

$$I \cdot X_c = \frac{2}{\pi} \cdot U_d \cdot \sqrt{1 - \pi \cdot \frac{U_{ПН}}{U_d} \cdot \cos \delta + \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{U_{ПН}}{U_d}\right)^2} \quad (3)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{\sin \delta}{\cos \delta - \frac{\pi \cdot U_{ПН}}{2 \cdot U_d}} \quad (4)$$

$$\varphi = \frac{3}{2} \cdot \pi - \alpha \quad (5)$$

$$P_{ПН} = I \cdot U_{ПН} \cos \alpha \quad (6)$$

$$Q_{ПН} = I \cdot U_{ПН} \sin \alpha \quad (7)$$

$$I_d = -\frac{3}{\pi} \cdot \frac{U_{ПН}}{X_c} \sin \delta \quad (8)$$

Активную и реактивную мощности можно получить, выделив на рисунке 24 и рисунке 25 активную и реактивную составляющие фазного тока, в более простом виде:

$$P_{\text{ПН}} = \frac{U_{\text{ПН}} \cdot U_{\text{С}}}{X_{\text{С}}} \sin \delta \quad (9)$$

$$Q_{\text{ПН}} = \frac{U_{\text{ПН}}(U_{\text{ПН}} - U_{\text{С}} \cdot \cos \delta)}{X_{\text{С}}} \quad (10)$$

P-Q диаграмма для преобразователя напряжения выглядит следующим образом:

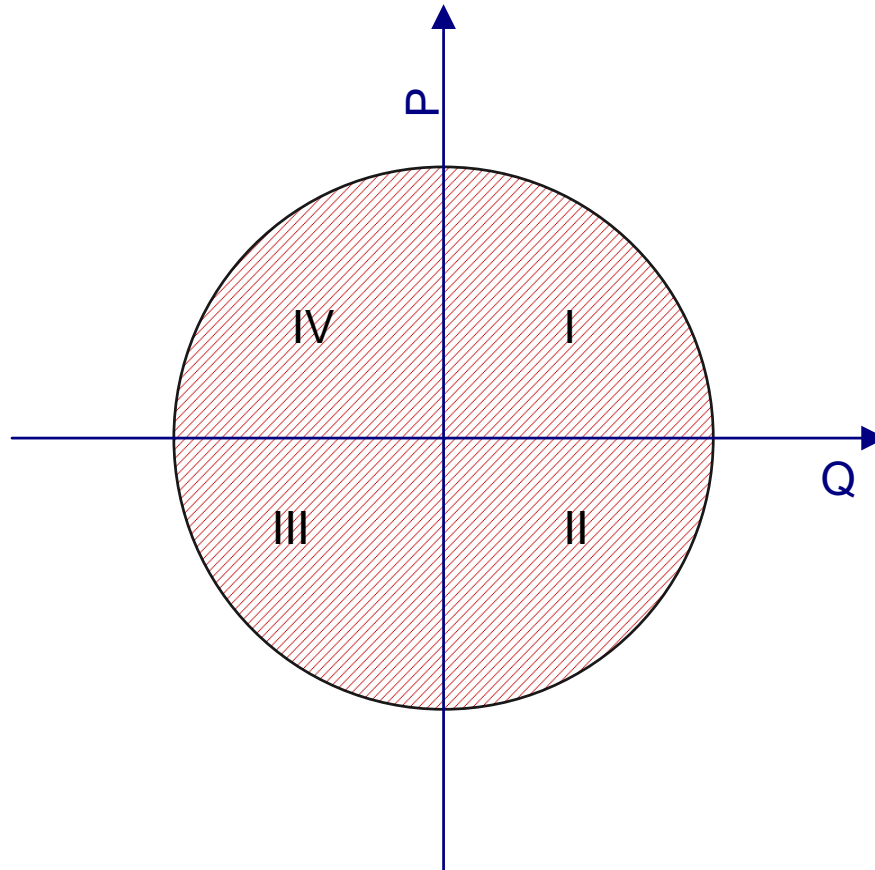


Рисунок 26 – P-Q диаграмма ПН

С помощью преобразователя напряжения мы можем работать во всех четырёх частях диаграммы. Благодаря преобразователю напряжения можем выдавать и потреблять, активную и реактивную мощность.

Данный преобразователь используется как основной элемент при построении различных технических средств для управления режимами ЛЭП, называемых в зарубежных публикациях FACTS (Flexible AC Transmission Systems — гибкие системы передачи переменного тока). Под гибким управлением режимами работы

ЛЭП понимают возможность изменения передаваемой по ней активной мощности, а также сопутствующей реактивной мощности за счет воздействия на значения напряжений, полного сопротивления и угла электропередачи. При этом решается комплекс вопросов, таких как:

- поддержание требуемого уровня напряжения на линии; обеспечение повышенных пределов статической (апериодической и колебательной) и динамической устойчивости и соответственно высокой пропускной способности ЛЭП;

- демпфирование электромеханических и электромагнитных колебаний в передающей системе;

- предупреждение и подавление самовозбуждения и самораскачивания генераторов.

2.3 ПН в режиме СТАТКОМ

Параллельно подключенный к шинам преобразователь напряжения может выполнять функции компенсатора реактивной мощности, называемого в зарубежной практике STATCOM (СТАТКОМ). Режим СТАТКОМ - это компенсаторный режим ПН.

Простейшим среди устройств, основанных на технологии мощных транзисторов или «запираемых» тиристоров, является СТАТКОМ. Устройство представляет собой электронный генератор электродвижущей силы промышленной частоты, регулируемой по амплитуде и обеспечивающей как выдачу, так и потребление реактивной мощности. Устройство выполнено на принципе преобразования напряжения, для него характерно использование высокочастотного широтно-импульсного управления. СТАТКОМ обладает высоким быстродействием, скорость перехода от максимальной выдачи реактивной мощности при ее управлении к максимальному потреблению составляет всего полпериода основной частоты.

Как следует из рассмотрения режимов работы ПН, режим работы компенсатора характеризуется углом управления $\delta = 0$.

При этом:

$$P_{\text{ПН}}=0 \quad (11)$$

$$Q_{\text{ПН}} = \frac{U_{\text{ПН}}(U_{\text{ПН}}-U_{\text{C}})}{X_{\text{C}}} \quad (12)$$

То есть значение и знак реактивной мощности определяются разностью напряжений сети и преобразователя, которая регулируется изменением напряжения $U_{\text{д}}$. В реальных схемах в качестве источника постоянного напряжения используется конденсаторная батарея $C_{\text{д}}$, напряжение на которой изменяется кратковременным переводом преобразователя в выпрямительный или инверторный режим, вследствие чего в токе $i_{\text{д}}$ появляется постоянная составляющая, которая заряжает или разряжает батарею до нужного напряжения. Отметим, что в традиционных СТК осуществляется обмен

электромагнитной энергии между сетью и реактивными элементами (конденсаторы и реакторы), что требует равенства мощности его элементов и компенсирующей мощности. В ПН и Статкоме тиристорный коммутатор осуществляет обмен реактивной мощности между фазами, что значительно снижает установленную мощность реакторов и конденсаторной части. Так, мощность реакторов составляет 15—20%, а конденсаторов — около 10% мощности компенсатора.

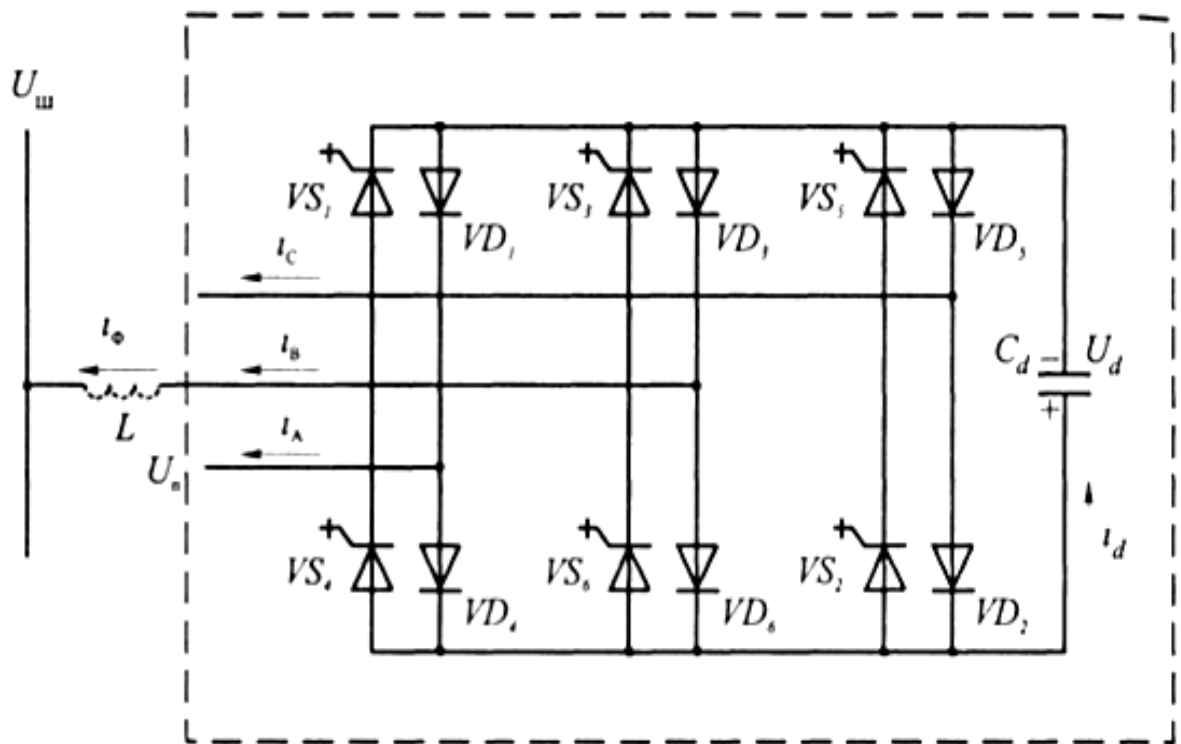


Рисунок 27 – Схема статкома [12]

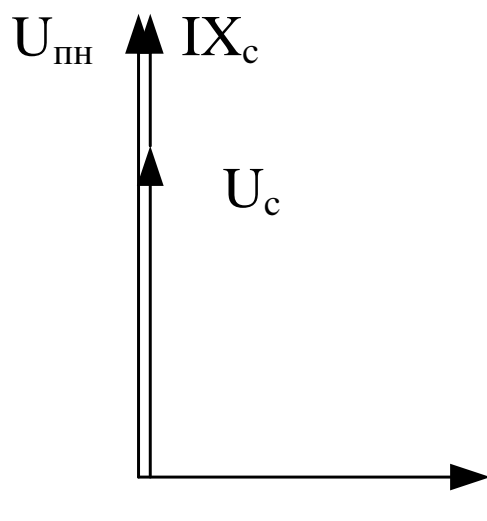


Рисунок 28 – Векторная диаграмма статкома в режиме потребления реактивной мощности

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.03.02.2017.185.00 ПЗ

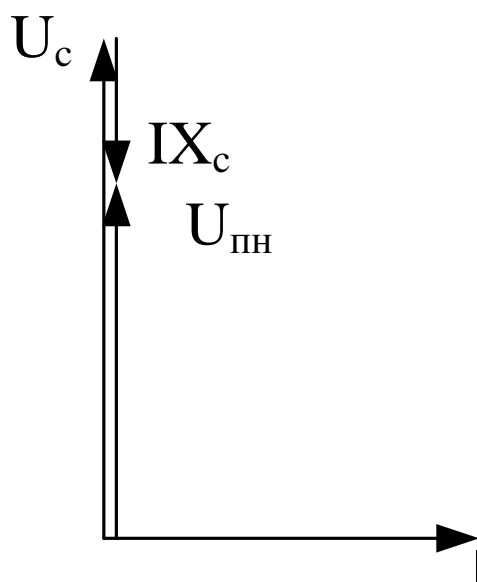


Рисунок 29 – Векторная диаграмма статкома в режиме выдачи реактивной мощности

В сетевом токе однофазного ПН содержатся гармоники, кратные $6k \pm 1$, среди которых наибольшими являются 5-я и 7-я гармоники. Их устранение осуществляется несколькими путями:

- организацией многомостовых 12-фазных (два преобразователя) или 24-фазных (четыре преобразователя) схем, в которых преобразователи к емкости C_d подключаются параллельно;

- созданием многоуровневых преобразователей, форма напряжения которых соответствует 12-фазной схеме;

- введением широтно-импульсной модуляции (ШИМ) в систему управления, которая по специальному алгоритму делает два дополнительных переключения запираемых тиристоров, образуя разрывы в ступенях фазного напряжения, таких же как рассмотренное ранее в принципе действия автономного инвертора напряжения. [14]

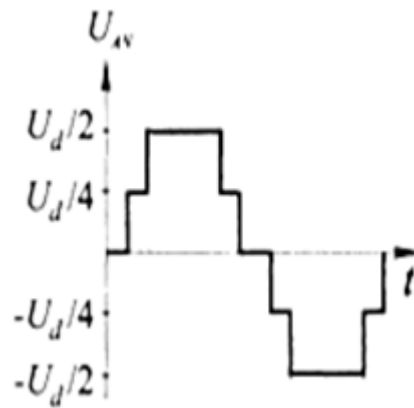
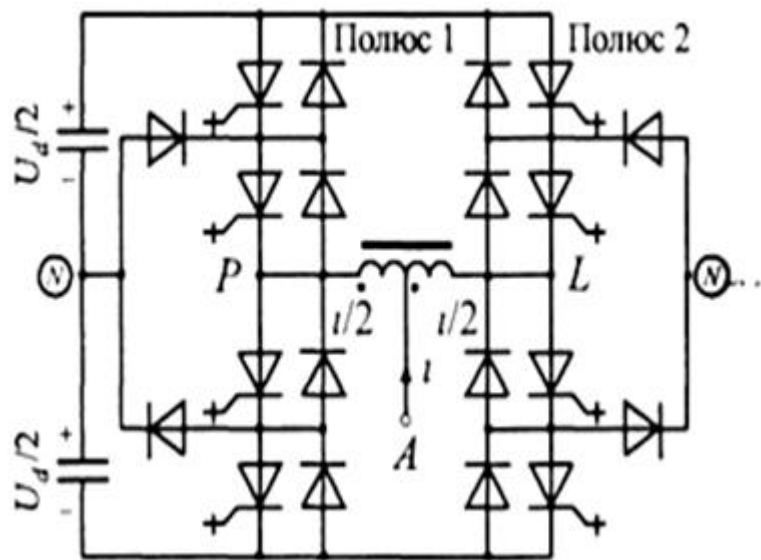


Рисунок 30 – Многоуровневый преобразователь [8]

Для наглядности как и для предыдущих устройств изобразим P-Q диаграмму для статкома:

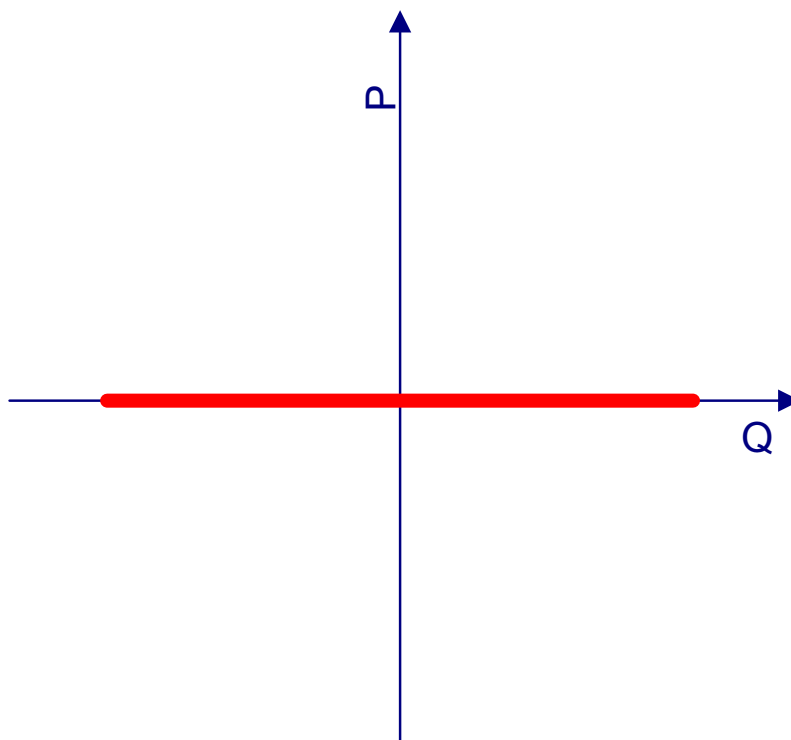


Рисунок 31 – P-Q диаграмма СТАТКОМа

В начале 80-х годов в АО ВНИИЭ была разработана научно- методическая основа расчетов параметров элементов СТАТКОМа, а также создан экспериментальный образец мощностью 1,7 МВар на напряжение 10 кВ. Проведенные экспериментальные исследования этой установки подтвердили высокую эффективность данного класса преобразователя при использовании в качестве компенсатора реактивной мощности.

Работы в этом направлении проводились и ведутся в США и Японии. Научно-технический центр корпорации Westinghouse Electric с участием института EPRI и энергокомпании TVA разработал и создал экспериментально-промышленную установку Statcom. Установка включена в эксплуатацию в ноябре 1995 г. на подстанции Sullivan в Tennessee Valley Authority (TVA).

Статком содержит восемь параллельных преобразователей мощностью 12,5 Мвар каждый, образующих 48-пульсную схему, что позволяет получать практически синусоидальную форму трехфазного напряжения компенсатора.

					13.03.02.2017.185.00 ПЗ	Лист
						37
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Общая мощность компенсатора ± 100 МВар, диапазон регулирования 200 МВар. Статком через трансформатор 5,1/161 кВ подключен к шинам 161 кВ подстанции. Номинальное выпрямленное напряжение на конденсаторе преобразователей, подключенных к нему параллельно, составляет 6,6 кВ.

Каждый вентиль инвертора состоит из пяти последовательно соединенных модулей — один из них избыточный. Запирание тиристоров автоматически выполняется так, чтобы обеспечивалось равномерное распределение напряжений между тиристорами. Тиристоры имеют номинальное напряжение 4 500 В и ток 4 000 А (максимум отключаемого тока) и охлаждаются водой. Общее число тиристоров 200. Общая занимаемая установкой площадь имеет размеры 30×16 м.

Подстанция Sullivan расположена на периферии энергетического региона, обслуживаемого TVA, и имеет достаточно слабые связи с системой по сети 500 кВ. Шины 500 кВ подстанции связаны с шинами 161 кВ через трансформатор мощностью 1 200 МВ*А. Подстанцию питают также четыре линии 161 кВ. В периоды малых нагрузок наблюдается повышение напряжения на шинах 500 кВ из-за зарядной мощности сети, а в периоды максимальных нагрузок напряжение на шинах 161 кВ оказывается пониженным. Установленный на подстанции СТАТКОМ обеспечивает необходимый диапазон регулирования реактивной мощности. Устранение колебаний напряжения с помощью СТАТКОМа позволило резко снизить число переключения устройств РПН на трансформаторах 500 кВ, что существенно снизило их повреждаемость. [1]

Специалисты считают, что сегодня СТАТКОМ — наиболее совершенное статическое устройство FACTS. Он обладает высоким быстродействием, малым содержанием высших гармоник, малыми габаритами, может использоваться в любых электрических сетях. Использование СТАТКОМ позволяет не только регулировать напряжение, но и увеличивать пропускную способность сети, оптимизировать потоки мощности, улучшать форму кривой напряжения и т.д. Модификация СТАТКОМа — активный фильтр — позволяет компенсировать все высшие гармоники в сетях.

					13.03.02.2017.185.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		38

2.4 Устройства продольной компенсации

Устройства продольной компенсации (УПК) применяются для увеличения пропускной способности воздушных линий и перераспределения потоков мощности по линиям. В самом простом случае представляют собой батареи конденсаторов, включаемые последовательно в линии электропередачи для компенсации части продольного индуктивного сопротивления.

На рисунке 32 показан участок сети линии электропередач. Что бы перебросить мощность с первой на вторую линию включают конденсаторную батарею.

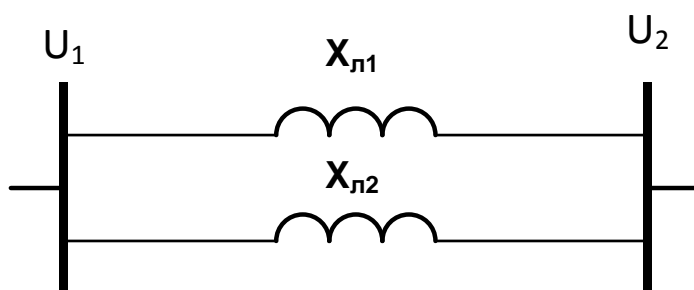


Рисунок 32 – Схема замещения участка сети

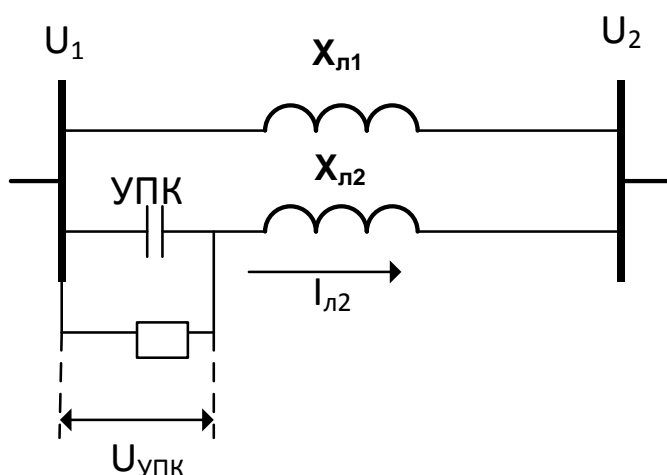


Рисунок 33 – Пример включения УПК в ЛЭП

Изначально сопротивление второй линии было равно $X_{л2}$, после включения в неё устройства продольной компенсации:

$$X'_{л2} = X_{л2} + X_c \quad (13)$$

то есть:

$$X'_{л2} = j\omega L_{л2} + \frac{1}{j\omega C_{уПК}} \quad (14)$$

Из формулы видно, что сопротивление линии уменьшилось. Фактически продольная компенсация увеличивает продольное напряжение линии. Данный способ широко используется на практике в том случае, когда с перегруженной линии нужно перебросить поток мощности на линию с более высоким напряжением, то есть менее загруженную.

Для наглядности изобразим векторную диаграмму для данного случая:

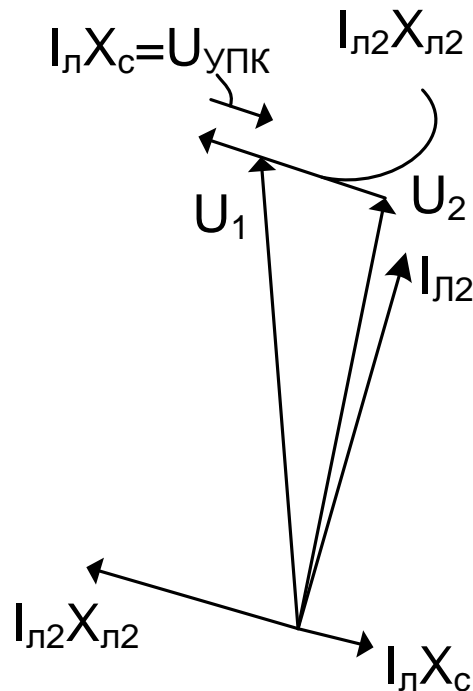


Рисунок 34 – Векторная диаграмма линии 2

Более технологичными являются устройства продольной компенсации на базе конденсаторной батареи и преобразователя напряжения.

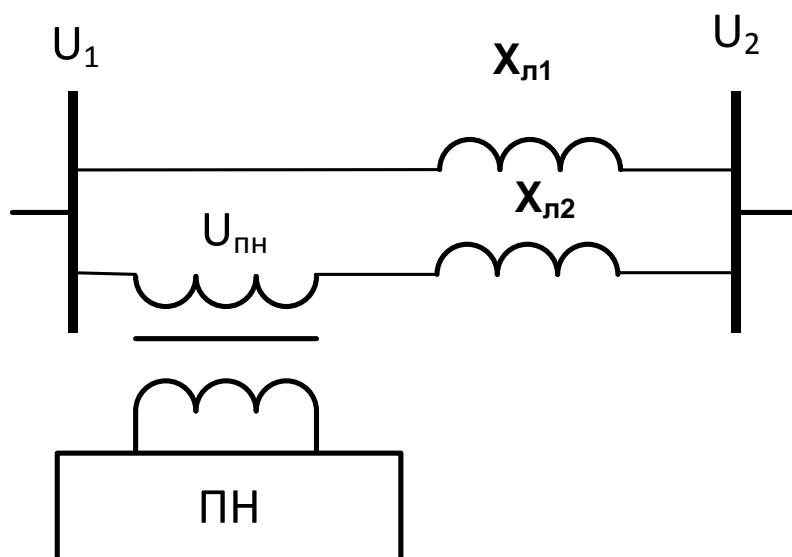


Рисунок 35 – Пример включения продольной компенсации на базе ПН

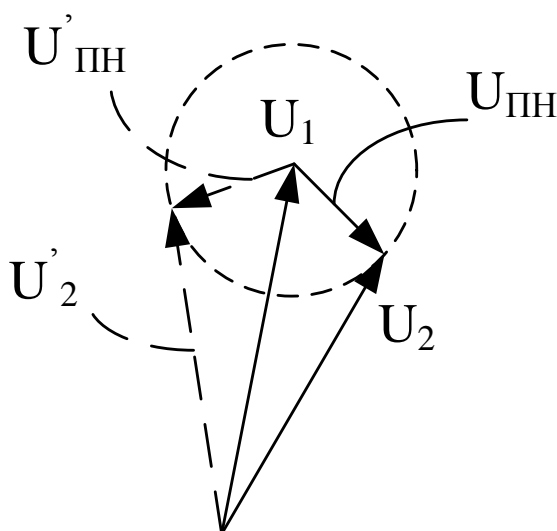


Рисунок 36 – Векторная диаграмма продольной компенсации на базе ПН

За счёт использования преобразователя напряжения мы имеем возможность регулировать не только величину напряжения, но и его фазу.

На векторной диаграмме показан принцип действия фазопоротного устройства совместно с продольной компенсацией, т.е. использования УПК на базе ПН. Здесь пунктиром показано возможное расположения векторов U_2 , в зависимости от величины и направления вектора $U_{\text{ПН}}$.

Важным качеством последовательных конденсаторов, как части системы электропередачи, является их высокая надежность и собственное устройство

защиты. К настоящему времени устройства продольной компенсации доведены до такого уровня, что их надежность находится на уровне таких элементов как линии, выключатели, трансформаторы и т.д.

Система защиты УПК обеспечивает, с одной стороны, быстрое и эффективное шунтирование конденсаторов в условиях, когда внешние возмущения могли бы вызвать повреждение конденсаторного оборудования, а с другой, повторное включение УПК в систему с минимальным запаздыванием после ликвидации повреждения в примыкающей сети.

Выбор местоположения и степени компенсации УПК производится на основе оценки экономичности и надежности работы энергосистемы. Степень компенсации обычно находится между 20 и 70 % по отношению к индуктивному реактансу линии. Установленная мощность УПК находится обычно в диапазоне между 100 и 1000 МВ·А.

Технология выполнения устройств УПК непрерывно совершенствуется как в части самих конденсаторов, которые улучшаются по надежности, плотности мощности и потерям, так и устройств защиты, систем управления и т.д. Отмечается, что в части защиты технология, использующая окись цинка (ZnO), обеспечила новые возможности для повышения надежности и скорости восстановления. Дополнительное включение искрового промежутка обеспечило более рентабельное выполнение защиты на основе ZnO при высоких уровнях перенапряжений. Что касается системы управления, то волоконно-оптическая передача сигнала и микропроцессорная техника создали широкий диапазон возможностей для применения УПК в настоящее время и в будущем.

Оказывается, что вложение капитала в УПК, как альтернативу новой линии, часто оказывается выгодней по следующим причинам: инвестиционная стоимость установки является только небольшой частью стоимости линии, время сооружения УПК намного короче и нет проблемы трассы.

Технология УПК хорошо зарекомендовала себя сегодня как часть распределительных и основных сетей класса напряжения до 800 кВ. В настоящее

					13.03.02.2017.185.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		42

2.6 Принцип действия и устройство МУПК

Основные части МУПК - это силовой трансформатор, силовой преобразователь и система управления.

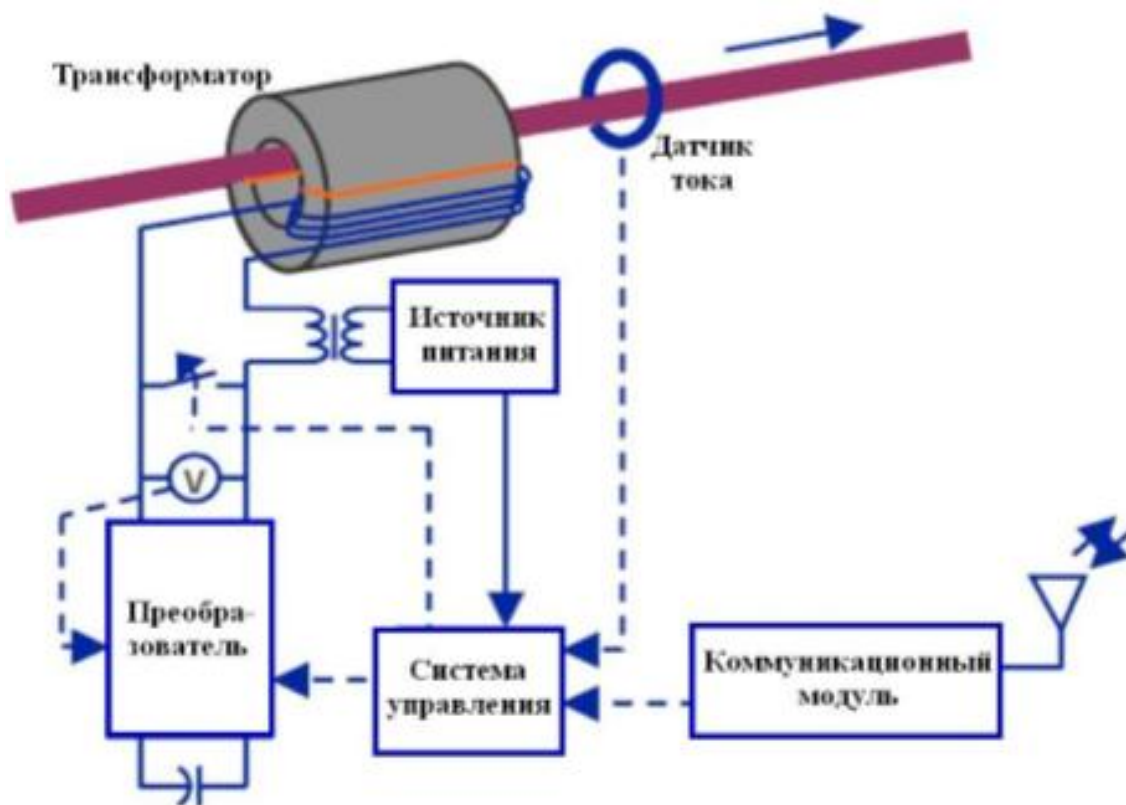


Рисунок 37 – Обобщённая структура МУПК

Наиболее популярной конфигурацией МУПК является устройство со структурной схемой показанной на рисунке 42.

Линия электропередачи

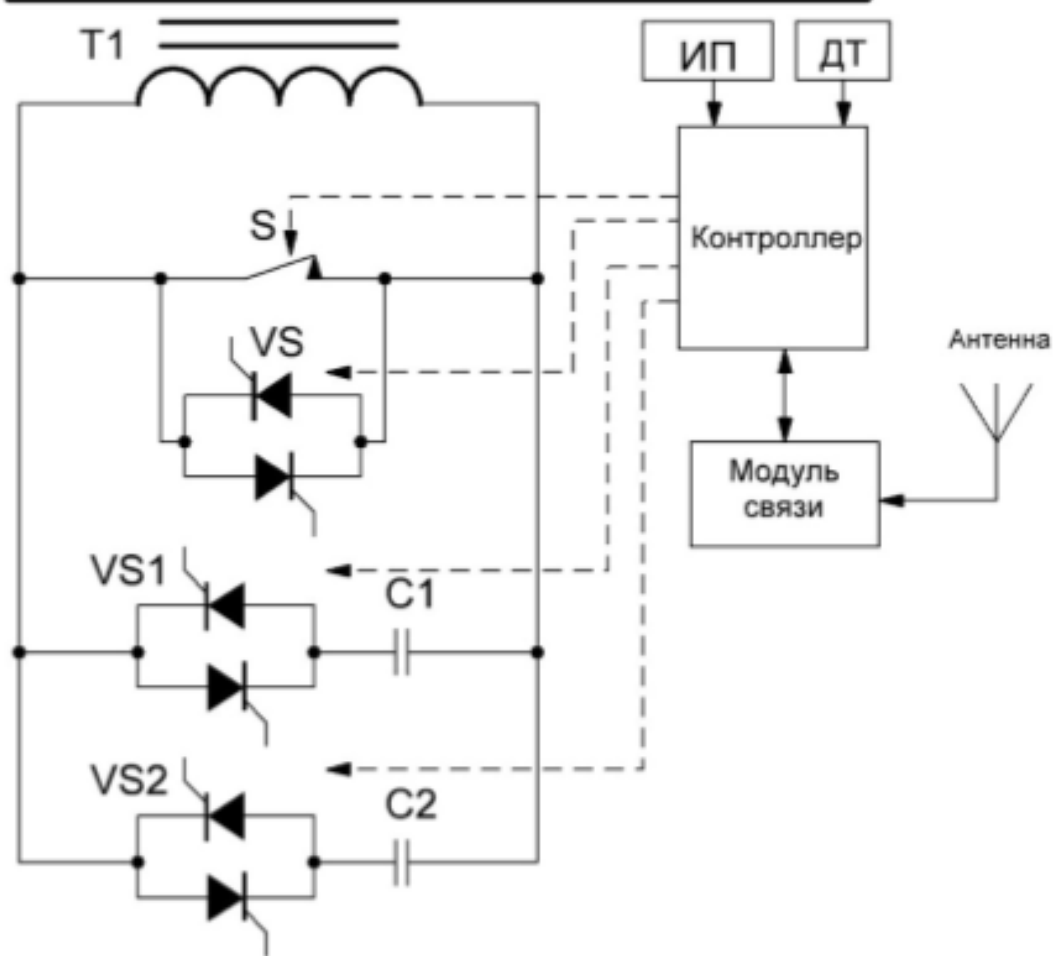


Рисунок 38 – Индуктивно-емкостной МУПК

Основные компоненты МУПК:

S - механический контактор, служащий для продолжительной работы в режиме байпас;

VS - управляемый полупроводниковый ключ, служащий для плавного перевода в режима байпас;

VS1, VS2 - полупроводниковые ключи, осуществляющие подключение конденсаторов C1 и C2 к вторичной обмотке трансформатора МУПК;

БУ - блок управления ключами VS1, VS2;

ДТ - датчик тока линии;

ИП - источник питания собственных нужд МУПК;

Модуль связи служит для дистанционного управления МУПК.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.03.02.2017.185.00 ПЗ

Лист

46

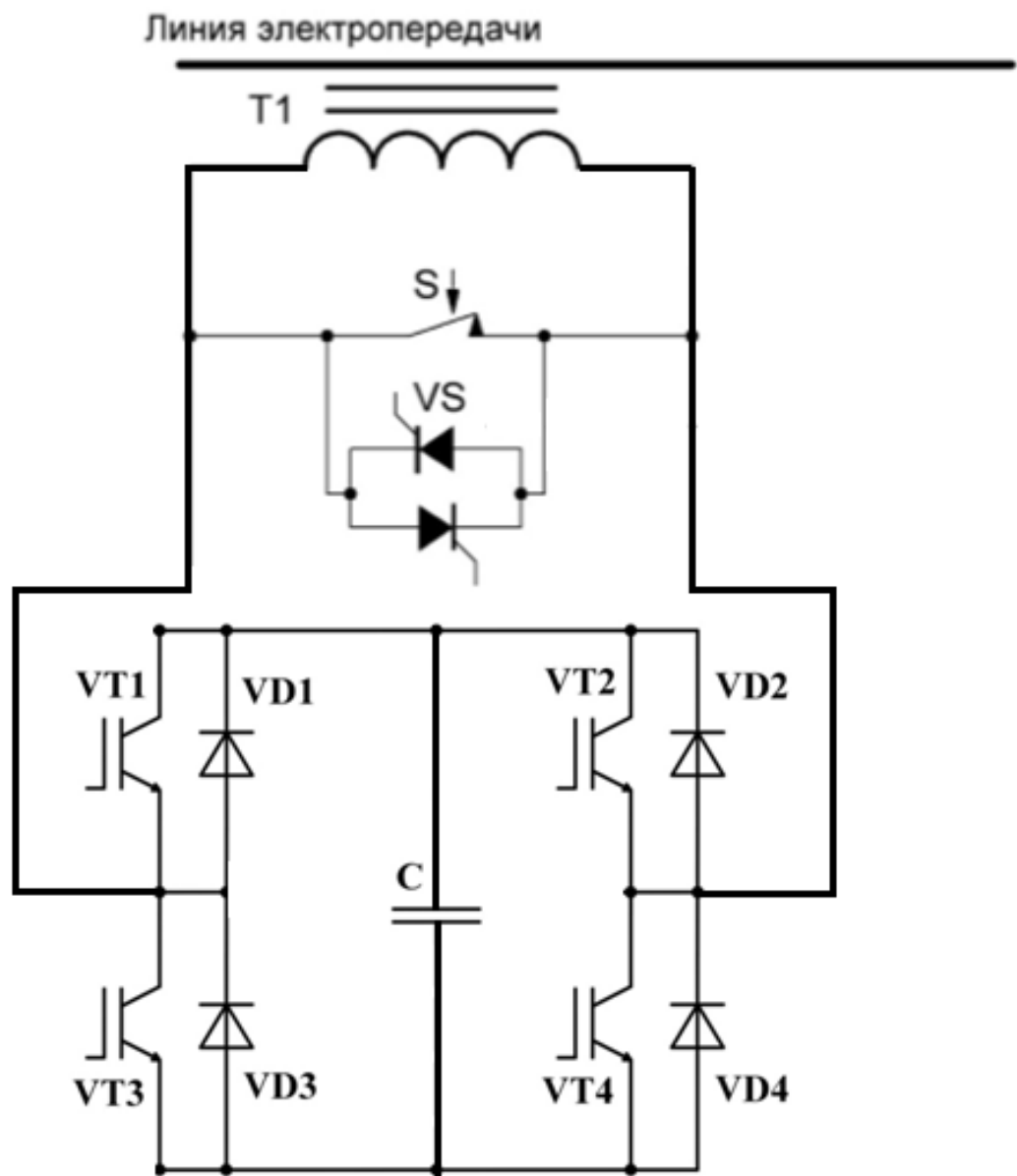


Рисунок 39 – Схема устройства МУПК с возможностью плавного регулирования сопротивления сети

Как видно из схемы плавное регулирование обеспечивается за счёт наличия в схеме транзисторов.

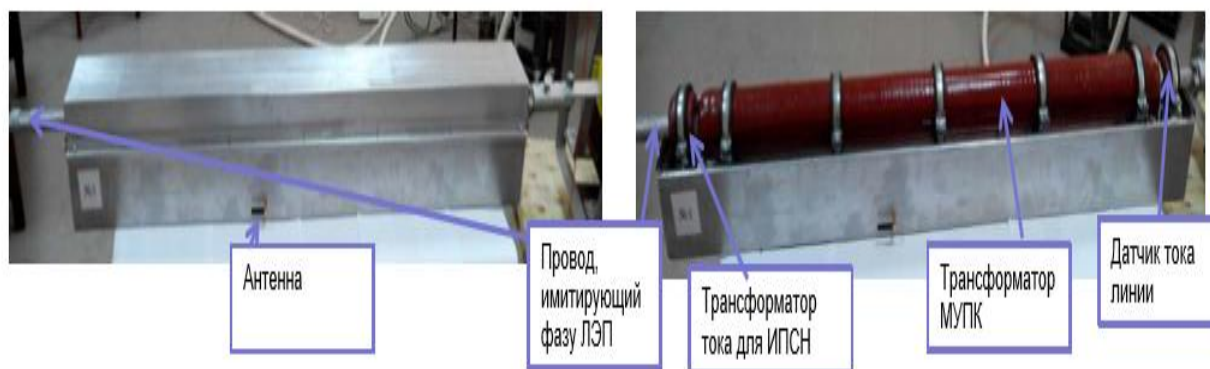


Рисунок 40 – Внешний вид МУПК

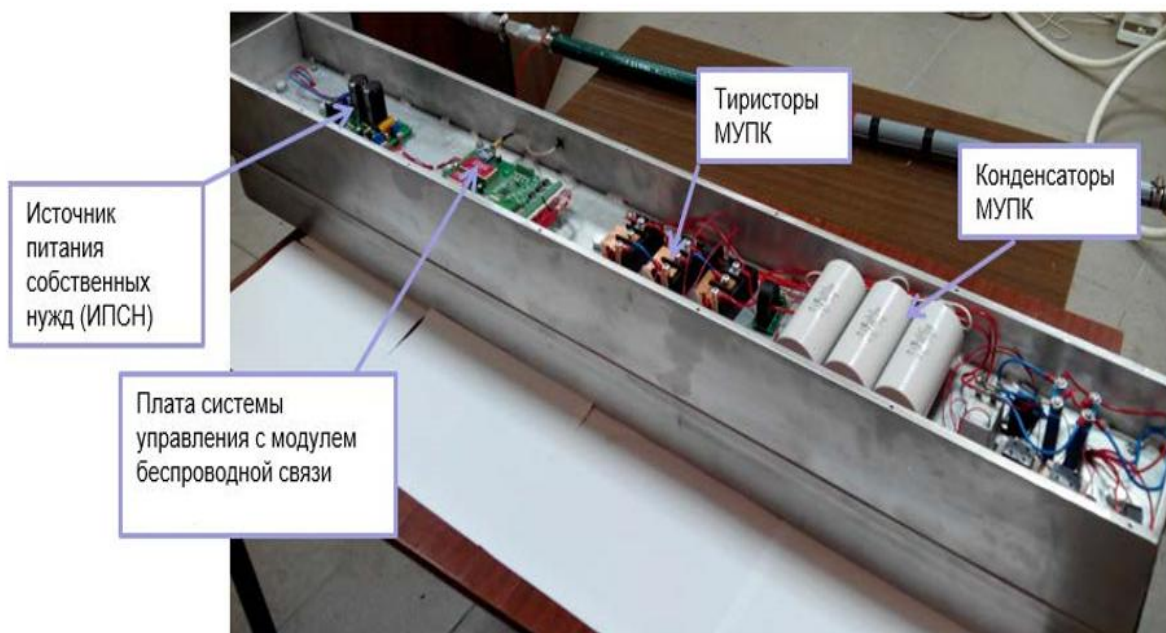


Рисунок 41 – Внешний вид силового преобразователя

3 РЕГУЛИРОВАНИЕ РЕЖИМА СЕТИ

3.1 Анализ длительного режима района электрической сети

Состояние электрической сети в любой момент времени называется режимом сети и характеризуется следующими параметрами режима: активной и реактивной мощностями в элементах сети; частотой; напряжением у потребителей и в узловых точках сети; величиной токов, протекающих по участкам сети; углами расхождения векторов ЭДС и напряжений; потерями мощности и падениями напряжения в элементах сети.

Задача расчёта режима заключается в нахождении его параметров с целью определения условий, в которых работает оборудование сети и её потребители. По результатам расчёта оценивается экономичность работы сети, предлагаются эффективные способы снижения потерь энергии, устанавливаются уровни напряжения на подстанциях и мероприятия по поддержанию их в допустимых пределах. При рассмотрении работы режима сети мы будем акцентировать внимание на условиях в которых работает оборудование подстанции. [6]

Для определения состояния электрической сети ограничимся рассмотрением следующих характерных длительных режимов:

- максимальных нагрузок в зимние сутки, когда возникают потоки мощности, связанные с наибольшим потреблением электроэнергии;
- минимальных нагрузок в летние сутки;
- послеаварийный режим, когда один или несколько элементов системы находится в нерабочем состоянии.

Режимы наибольших и наименьших нагрузок энергосистемы во многих случаях могут считаться достаточно показательными, так как параметры остальных режимов должны находиться между рассчитанными предельными. [7]

Послеаварийный режим рассмотрим наиболее неблагоприятный для системы, оценивая токовую загрузку ЛЭП.

										Лист
										51
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

13.03.02.2017.185.00 ПЗ

Для удобства анализа режима параметры линии и установленные трансформаторы приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 2 – Параметры линий

Номер ветви (начальный и конечный узел)	Марка установленного провода	Длина провода(км)
1-2	2×АС 120/19	60
2-3	АС 95/16	50
3-4	2×АС 150/24	40
3-7	АС 150/19	60
7-8	АС 95/16	30
8-2	2×АС 120/19	40
11-12	АС 50/8	18
12-13	АС 50/8	10
13-11	АС 70/11	5
15-3	2×АС 120/19	25
15-2	АС 95/16	35
16-2	2×АС 95/16	30
16-8	АС 70/11	35
18-14	АС 240/32	55
18-17	АС 240/32	60

Таблица 3 – Установленные трансформаторы

Номер ветви	Марка установленного трансформатора
4-6	ТДЦ 21000/110
4-5	ТДЦ 80000/110
7-9-10(9-11)	2×ТДТН 25000/110
14-7	АТДЦТН 250000/220
17-8	АТДЦТН 250000/220
18-19	ТДЦ 200000/110
18-20	ТДЦ 80000/110
18-21	ТДЦ 125000/110

Проводим анализ трансформаторов, находящихся в нашей системе. При установке трансформаторов и автотрансформаторов на электрических станциях и подстанциях, с одной стороны, следует стремиться к обеспечению надежной связи с системой и надежному электроснабжению потребителей, а с другой – к уменьшению и мощности и их количества.

Для п/ст 4:

					13.03.02.2017.185.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		52

При выборе двух трансформаторов для установки, мы должны учитывать случай отказа одного из них. В этом случае, трансформатор, который остался в работе должен передавать всю необходимую мощность:

$$S_{\text{расч}} \leq S_{\text{ном}} \cdot k_{\text{п.ав.}} \quad (15)$$

Расчетный коэффициент примем равный 1,4. Если коэффициент начальной нагрузки не превышает значение 0,93, а трансформатор будет загружен не более 6 часов в сутки, то в данных условиях эксплуатация одного трансформатора в перегруженном состоянии допустима в течении 5 суток.

$$S_{\text{ном}} \geq S_{\text{max}} \cdot (0,65 \div 0,7) \quad (16)$$

С учетом условия (2), анализируем установленный трансформатор:

$$S_{\text{max}} = 0,7 \cdot (S_{41+} + S_{42+} + S_4) = 0,7 \cdot (2+i1,11 + 7+i3,8 + 12+i7,5) = 17,1 \text{ МВА}$$

Трансформаторы ТДТН-25000/110 удовлетворяют требованию.

Для каждого блока электростанции $S_{\text{ном}}$ трансформатора должна быть больше мощности протекающей через него:

$$S_{\text{ном}} \geq S_{\text{max}} \quad (17)$$

Для ЭС-1 Блок №1:

$$S_{\text{max}} = S_{\text{генератора 1}} - S_{\text{с.н.}} = 60+i45 - 3,6-i2,5 = 71 \text{ МВА}$$

Для ЭС-1 Блок №2:

$$S_{\text{max}} = S_{\text{генераторов 2}} - S_{\text{ЭС-1}} = 50+i37,5 - 55-i30,4 = 8,7 \text{ МВА}$$

Для ЭС-2 Блок №1:

$$S_{\text{max}} = S_{\text{генератора 3}} - S_{\text{с.н.}} = 110+i82,5 - 6,6-i5 = 129,2 \text{ МВА}$$

Для ЭС-2 Блок №2:

$$S_{\text{max}} = S_{\text{генераторов 4}} - S_{\text{с.н.}} = 60+i45 - 3,6-i2 = 71 \text{ МВА}$$

Для ЭС-2 Блок №3:

$$S_{\text{max}} = S_{\text{генераторов 5}} - S_{\text{с.н.}} = 90+i67,5 - 3,6-i2 = 108,4 \text{ МВА}$$

Все трансформаторы, установленные на ЭС-1 и ЭС-2 выбраны верно.

Анализ работы понижающих трансформаторов 220/110 кВ для п/ст 4 и п/ст 5:

$$S_{\text{ном}} \geq S_{\text{max}} \quad (18)$$

$$S_{\max} = S_{\max \text{ ЭС-2 блок №1}} + S_{\max \text{ ЭС-2 блок №2}} + S_{\max \text{ ЭС-2 блок №3}} - S_{\text{ЭС-2}} = 129,2 + 71 + 108,4 - 76,6 = 232 \text{ МВА}$$

Трансформаторы марки АДЦТН 250000/220, установленные на п/ст 4 и п/ст 5 отвечают требованию.

В зависимости от марки провода каждая ЛЭП имеет длительно-допустимые токовые нагрузки. Для использованных нами проводов ЛЭП длительно-допустимые токовые нагрузки приведены в таблице 3.

Таблица 4 – Допустимые длительные токовые нагрузки на неизолированные провода ЛЭП [3]

Марка провода	Токовая нагрузка(А)
АС 50/8	210
АС 70/11	265
АС 95/16	330
АС 120/19	390
АС 150/24	450
АС 240/32	605

Проводить расчёт режимов работы сети будем с помощью программы RastrWin.

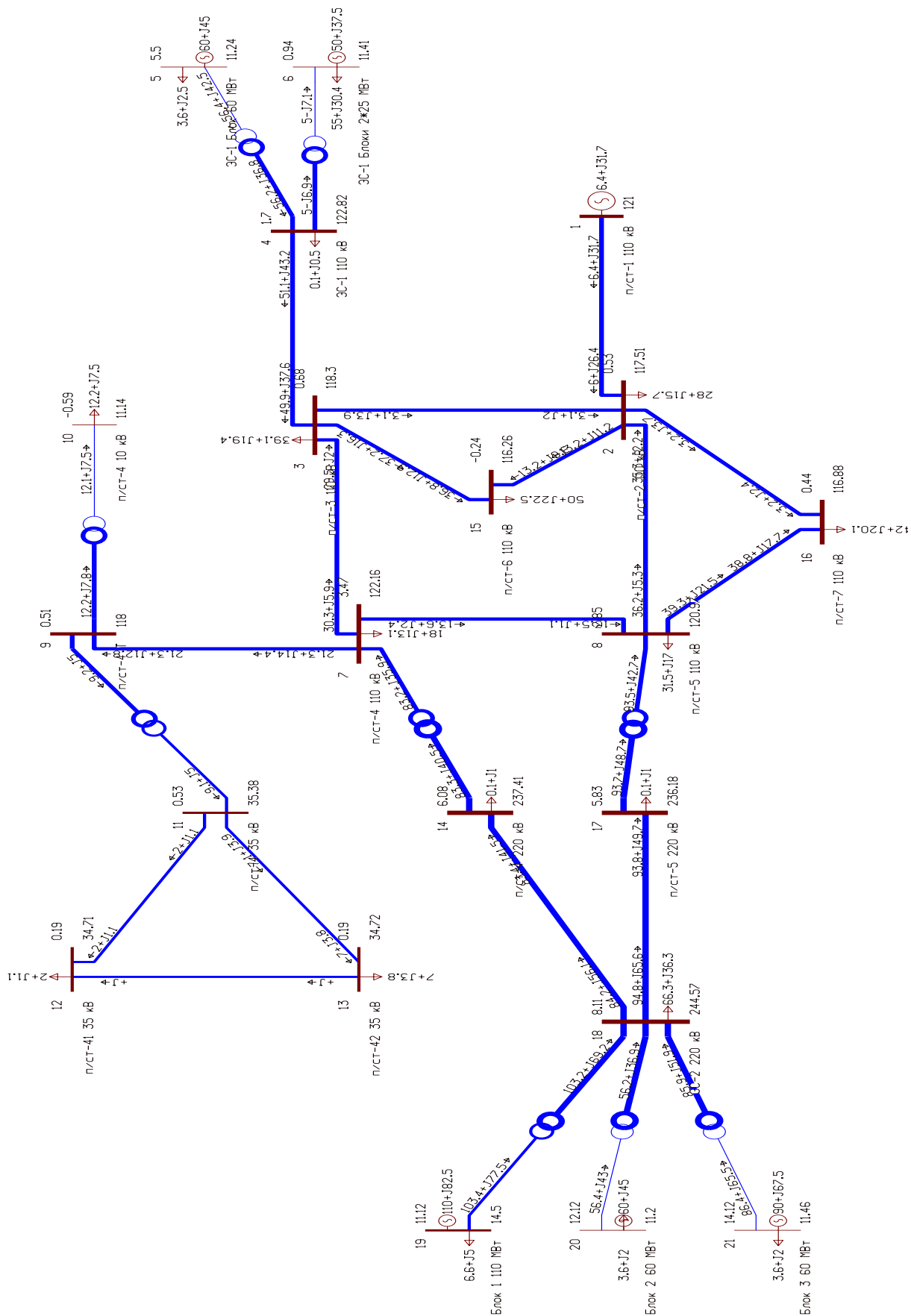


Рисунок 43 – Максимальный режим работы района сети

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.03.02.2017.185.00 ПЗ

Лист

55

Таблица 5 – Токовая нагрузка ЛЭП при максимальном режиме работы сети

Номер начального узла	Номер конечного узла	Название	Максимальный ток(А)
1	2	п/ст-1 110 кВ - п/ст-2 110 кВ	154
2	3	п/ст-2 110 кВ - п/ст-3 110 кВ	24
3	4	п/ст-3 110 кВ - ЭС-1 110 кВ	314
3	7	п/ст-3 110 кВ - п/ст-4 110 кВ	146
7	8	п/ст-4 110 кВ - п/ст-5 110 кВ	65
8	2	п/ст-5 110 кВ - п/ст-2 110 кВ	175
11	12	п/ст-4 35 кВ - п/ст-41 35 кВ	37
12	13	п/ст-41 35 кВ - п/ст-42 35 кВ	1
13	11	п/ст-42 35 кВ - п/ст-4 35 кВ	133
15	3	п/ст-6 110 кВ - п/ст-3 110 кВ	198
15	2	п/ст-6 110 кВ - п/ст-2 110 кВ	85
16	2	п/ст-7 110 кВ - п/ст-2 110 кВ	24
16	8	п/ст-7 110 кВ - п/ст-5 110 кВ	162
18	14	ЭС-2 220 кВ - п/ст-4 220 кВ	239
18	17	ЭС-2 220 кВ - п/ст-5 220 кВ	272

Таблица 6 – Напряжение в узлах сети при максимальном режиме работы

Номер	Название	U_ном	V	dV
1	п/ст-1 110 кВ	115	121,00	5,22
2	п/ст-2 110 кВ	110	117,51	6,82
3	п/ст-3 110 кВ	110	118,30	7,54
4	ЭС-1 110 кВ	110	122,82	11,65
5	ЭС-1 Блок 60 МВт	10	11,24	7,03
6	ЭС-1 Блоки 2*25 МВт	10	11,41	8,63
7	п/ст-4 110 кВ	110	122,16	11,06
8	п/ст-5 110 кВ	110	120,97	9,97
9	п/ст-4 Т	110	118,00	7,27
10	п/ст-4 10 кВ	10	11,14	11,45
14	п/ст-4 220 кВ	220	237,41	7,91
15	п/ст-6 110 кВ	110	116,26	5,69
16	п/ст-7 110 кВ	110	116,88	6,26
17	п/ст-5 220 кВ	220	236,18	7,35
18	ЭС-2 220 кВ	220	244,57	11,17

Продолжение таблицы 6

19	Блок МВт	1 110	14	14,50	7,39
20	Блок МВт	2 60	10	11,20	6,65
21	Блок МВт	3 60	10	11,46	9,18

Анализируя максимальный режим работы видим, что напряжения в узлах не превышают допустимого отклонения, ЛЭП не перегружены.

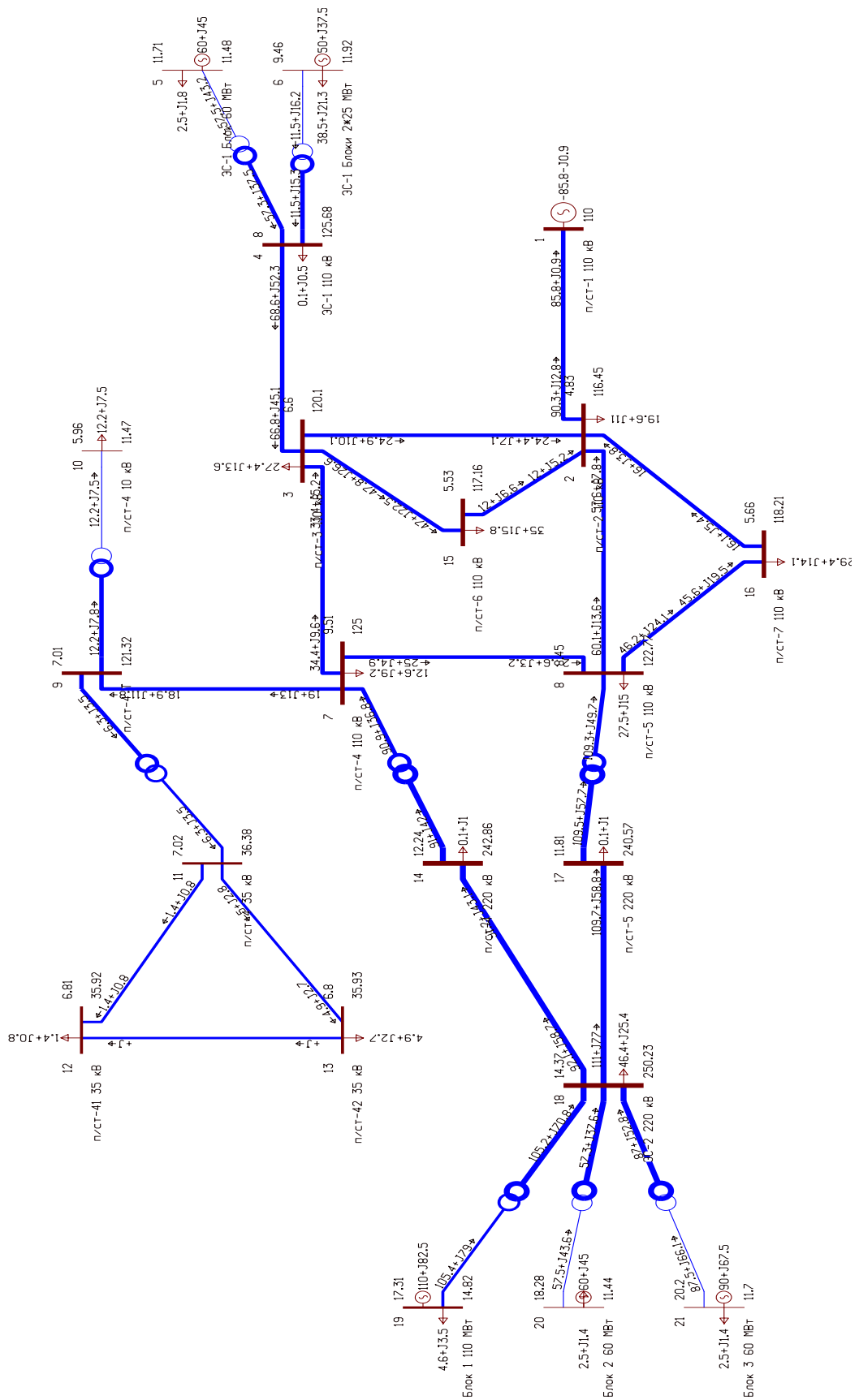


Рисунок 44 – Минимальный режим работы района сети

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.03.02.2017.185.00 ПЗ

Лист

58

Таблица 7 – Токовая нагрузка ЛЭП при минимальном режиме работы сети

Номер начального узла	Номер конечного узла	Название	Максимальный ток(А)
1	2	п/ст-1 110 кВ - п/ст-2 110 кВ	452
2	3	п/ст-2 110 кВ - п/ст-3 110 кВ	129
3	4	п/ст-3 110 кВ - ЭС-1 110 кВ	396
3	7	п/ст-3 110 кВ - п/ст-4 110 кВ	165
7	8	п/ст-4 110 кВ - п/ст-5 110 кВ	117
8	2	п/ст-5 110 кВ - п/ст-2 110 кВ	290
11	12	п/ст-4 35 кВ - п/ст-41 35 кВ	25
12	13	п/ст-41 35 кВ - п/ст-42 35 кВ	1
13	11	п/ст-42 35 кВ - п/ст-4 35 кВ	90
15	3	п/ст-6 110 кВ - п/ст-3 110 кВ	263
15	2	п/ст-6 110 кВ - п/ст-2 110 кВ	67
16	2	п/ст-7 110 кВ - п/ст-2 110 кВ	83
16	8	п/ст-7 110 кВ - п/ст-5 110 кВ	186
18	14	ЭС-2 220 кВ - п/ст-4 220 кВ	252
18	17	ЭС-2 220 кВ - п/ст-5 220 кВ	312

Таблица 8 – Напряжение в узлах сети при минимальном режиме работы

Номер	Название	U _{ном}	V	dV
2	п/ст-2 110 кВ	110	116,45	5,87
3	п/ст-3 110 кВ	110	120,10	9,18
4	ЭС-1 110 кВ	110	125,68	14,25
5	ЭС-1 Блок 60 МВт	10	11,48	9,38
6	ЭС-1 Блоки 2*25 МВт	10	11,92	13,50
7	п/ст-4 110 кВ	110	125,00	13,64
8	п/ст-5 110 кВ	110	122,77	11,61
9	п/ст-4 Т	110	121,32	10,29
10	п/ст-4 10 кВ	10	11,47	14,67
14	п/ст-4 220 кВ	220	242,86	10,39
15	п/ст-6 110 кВ	110	117,16	6,51
16	п/ст-7 110 кВ	110	118,21	7,46
17	п/ст-5 220 кВ	220	240,57	9,35
18	ЭС-2 220 кВ	220	250,23	13,74
19	Блок 1 110 МВт	14	14,82	9,78

Продолжение таблицы 8

20	Блок МВт	2 60	10	11,44	8,96
21	Блок МВт	3 60	10	11,70	11,44

Из анализа минимального режима видно, что для поддержания напряжения в узлах пришлось понизить напряжение в БУ до номинального - 110кВ, ЛЭП не перегружены.

Проведя анализ максимальных и минимальных режимов работы сети делаем вывод, что регулирование работы сети при максимальном и минимальном режиме работы не требуется.

Послеаварийный установившийся режим наступает после локализации аварии в системе. Этот режим, когда будет выведен из работы один или несколько элементов системы. При послеаварийных режимах может возникнуть так называемый дефицит мощности, когда мощность генераторов в оставшейся в работе части системы меньше мощности потребителей, возрасти токовая нагрузка ЛЭП. Параметры послеаварийного режима могут в той или иной степени отличаться от допустимых значений. Если значения этих параметров во всех контрольных точках системы являются допустимыми, то исход аварии считается благополучным. В противном случае исход аварии неблагоприятен и диспетчерская служба системы принимает немедленные меры к тому, чтобы привести параметры послеаварийного режима в соответствие с допустимыми. Рассмотрим один послеаварийный режим - самый неблагоприятный для системы, когда значения параметров сети наиболее сильно превышают допустимые, ЛЭП принимают наибольшую загруженность. Такой режим происходит при максимальных загрузках и вывода из работы ЛЭП 8-2 (п/ст-5 110 кВ - п/ст-2 110 кВ) и ЛЭП 2-3 (п/ст-2 110 кВ - п/ст-3 110 кВ). Смоделируем данный режим с помощью программы RastrWin.

										Лист
										60
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

13.03.02.2017.185.00 ПЗ

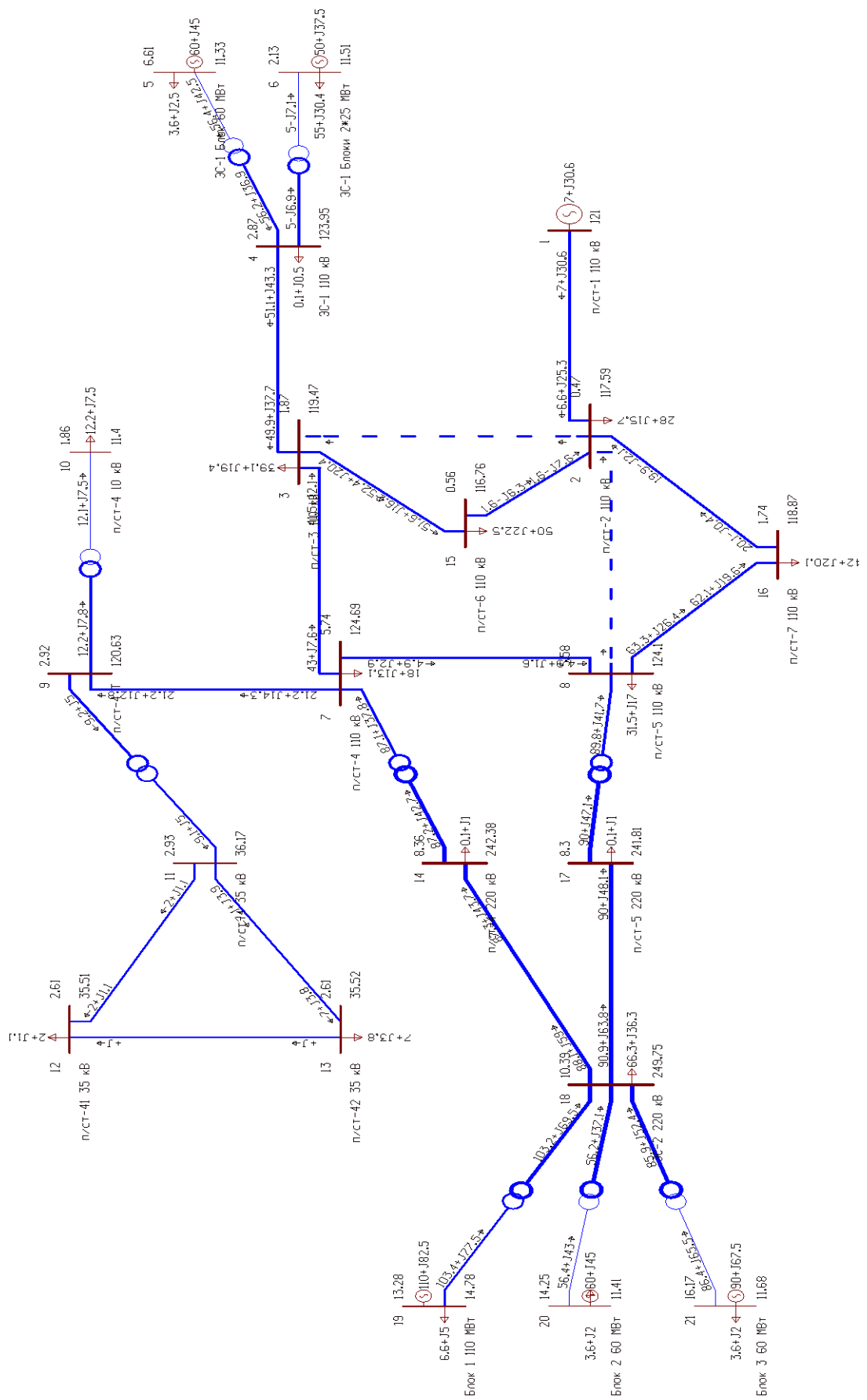


Рисунок 45 – Послеаварийный режим работы района сети

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.03.02.2017.185.00 ПЗ

Лист

61

Таблица 9 – Токовая нагрузка ЛЭП при послеаварийном режиме работы сети

Номер начального узла	Номер конечного узла	Название	Максимальный ток(А)
1	2	п/ст-1 110 кВ - п/ст-2 110 кВ	128
2	3	п/ст-2 110 кВ - п/ст-3 110 кВ	-
3	4	п/ст-3 110 кВ - ЭС-1 110 кВ	312
3	7	п/ст-3 110 кВ - п/ст-4 110 кВ	202
7	8	п/ст-4 110 кВ - п/ст-5 110 кВ	24
8	2	п/ст-5 110 кВ - п/ст-2 110 кВ	-
11	12	п/ст-4 35 кВ - п/ст-41 35 кВ	36
12	13	п/ст-41 35 кВ - п/ст-42 35 кВ	1
13	11	п/ст-42 35 кВ - п/ст-4 35 кВ	130
15	3	п/ст-6 110 кВ - п/ст-3 110 кВ	272
15	2	п/ст-6 110 кВ - п/ст-2 110 кВ	38
16	2	п/ст-7 110 кВ - п/ст-2 110 кВ	98
16	8	п/ст-7 110 кВ - п/ст-5 110 кВ	319
18	14	ЭС-2 220 кВ - п/ст-4 220 кВ	245
18	17	ЭС-2 220 кВ - п/ст-5 220 кВ	257

Проведя анализ послеаварийного режима работы электрической сети, в частности проведя расчёт токов в ветвях видим, что при максимальном режиме работы сети в ветви ЛЭП 16-8 установлен провод марки АС 70/11. Исходя из параметров провода, длительно-допустимых токовых нагрузок, делаем вывод, что недопустимо эксплуатировать сеть с данным проводом. Так как ток в линии в данном режиме равен 319 Ампер, а длительно-допустимый ток для данной марки провода 265 Ампер. В таком случае наиболее типичным решением проблемы является реконструкция линии: замена существующего провода проводом большего сечения или построение второй цепи, то есть использование двухцепной линии. Чтобы произвести реконструкцию ЛЭП нужно провести демонтаж старых опор, проводов и частей ЛЭП и монтаж новых. Как следствие, данный методы имеют недостатки: увеличение зоны отчуждения, вывод ЛЭП на долгое время реконструкции.

Таким образом, принимаем решение о регулирование режимом сети с помощью малогабаритного устройства продольной компенсации. В ветви сети

будем устанавливать МУПК с целью перераспределения потоков мощности, разгрузки ЛЭП 16-8 (п/ст-7 110 кВ - п/ст-5 110 кВ).

3.2 Установка МУПК в ЛЭП

Проведя анализ длительного режима работы сети с помощью программы RastrWin, видим, одна из ЛЭП перегружена 16-8 (п/ст-7 110 кВ - п/ст-5 110 кВ). Токи в линии значительно превышают значения, с которыми может работать линия в длительном режиме. Эту проблему можно решить с помощью реконструкции линии, но благодаря ранее сделанному обзору устройств FACTS, понимаем что для решения данной проблемы наиболее целесообразно будет использование МУПК для линий сети.

Для регулирования режима сети, а именно перераспределения потоков мощности, будем использовать МУПК. На рисунке 39 представлена схема работы сети до применения МУПК.

Проведем расчёт режима сети после установки МУПК.

					13.03.02.2017.185.00 ПЗ	Лист
						63
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

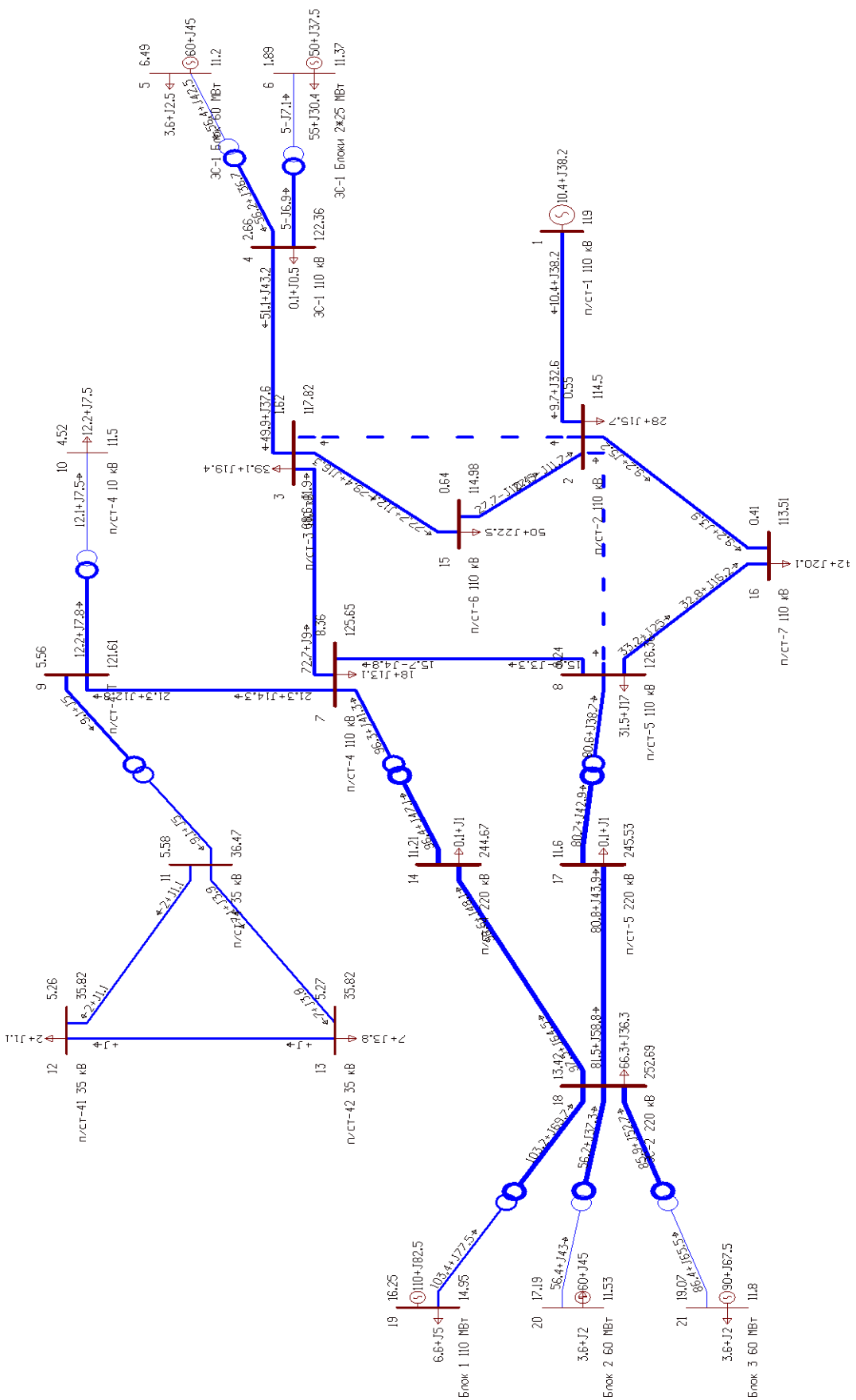


Рисунок 46 – Послеаварийный режим с применением работы МУПК

					13.03.02.2017.185.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		64

На рисунке 40 представлен режим работы сети после установления МУПК в линии. УПК устанавливаем в линию 16-8 (п/ст-7 110 кВ - п/ст-5 110 кВ), 16-2 (п/ст-7 110 кВ - п/ст-2 110 кВ), 15-2 (п/ст-6 110 кВ - п/ст-2 110 кВ), 15-3 (п/ст-6 110 кВ - п/ст-3 110 кВ). Для решения данной проблемы можно было установить одно МУПК в линию 16-8, но большей ёмкости. Устанавливая УПК в другие ЛЭП мы делаем электрическую сеть более "гибкой", то есть при других послеаварийных режимах, когда линии 16-2, 15-2 и 15-3 станут перегруженными, мы сможем перераспределить потоки мощности с этих ЛЭП, избежав предельной загрузки.

Таблица 10 – Токовая нагрузка ЛЭП при послеаварийном режиме работы сети с применением МУПК

Номер начального узла	Номер конечного узла	Название	Максимальный ток(А)
1	2	п/ст-1 110 кВ - п/ст-2 110 кВ	192
2	3	п/ст-2 110 кВ - п/ст-3 110 кВ	-
3	4	п/ст-3 110 кВ - ЭС-1 110 кВ	316
3	7	п/ст-3 110 кВ - п/ст-4 110 кВ	337
7	8	п/ст-4 110 кВ - п/ст-5 110 кВ	74
8	2	п/ст-5 110 кВ - п/ст-2 110 кВ	-
11	12	п/ст-4 35 кВ - п/ст-41 35 кВ	36
12	13	п/ст-41 35 кВ - п/ст-42 35 кВ	1
13	11	п/ст-42 35 кВ - п/ст-4 35 кВ	129
15	3	п/ст-6 110 кВ - п/ст-3 110 кВ	397
15	2	п/ст-6 110 кВ - п/ст-2 110 кВ	151
16	2	п/ст-7 110 кВ - п/ст-2 110 кВ	53
16	8	п/ст-7 110 кВ - п/ст-5 110 кВ	190
18	14	ЭС-2 220 кВ - п/ст-4 220 кВ	267
18	17	ЭС-2 220 кВ - п/ст-5 220 кВ	230

Таблица 11 – Напряжение в узлах сети при послеаварийном режиме работы с применением МУПК

Номер	Название	U ном	V	dV
3	п/ст-3 110 кВ	110	117,82	7,11
4	ЭС-1 110 кВ	110	122,36	11,24

Продолжение таблицы 11

5	ЭС-1 Блок 60 МВт	10	11,20	6,67
6	ЭС-1 Блоки 2*25 МВт	10	11,37	8,24
7	п/ст-4 110 кВ	110	125,65	14,23
8	п/ст-5 110 кВ	110	126,36	14,87
9	п/ст-4 Т	110	121,61	10,56
10	п/ст-4 10 кВ	10	11,50	14,96
14	п/ст-4 220 кВ	220	244,67	11,21
17	п/ст-5 220 кВ	220	245,53	11,61
18	ЭС-2 220 кВ	220	252,69	14,86
19	Блок 1 110 МВт	14	14,95	10,71
20	Блок 2 60 МВт	10	11,53	9,86
21	Блок 3 60 МВт	10	11,80	12,34

Анализируя таблицу 9 и таблицу 10, видим, что сеть работает исправно, не наблюдается токовая перегрузка ЛЭП и отклонение напряжения находятся в пределах допустимого. Для поддержания напряжения у потребителей в пределах допустимого, понизили напряжение в БУ до 119кВ

Благодаря устройству продольной компенсации мы добились нужного эффекта, а именно перераспределили поток мощности с линии на линии 16-8 (п/ст-7 110 кВ - п/ст-5 110 кВ) в длительном режиме работы сети, тем самым решив проблему реконструкции линии. При этом сеть работает исправно, нарушений в работе сети не наблюдается.

Как было отмечено во второй главе, использование МУПК на базе преобразователя напряжения позволяет не только перераспределить потоки мощности, но и увеличить пропускную способность линии. В данной работе рассматривается сеть с $U_{ном}=35/110/220$ кВ и длиной линий до 60 км.

Вывод: в нашем случае пропускная способность линий увеличивается незначительно, так как основной эффект увеличения пропускной способности наблюдается в длинных линиях, длиной более 300 км. и линиях с $U_{\text{ном}} \geq 330 \text{кВ}$.

					13.03.02.2017.185.00 ПЗ	Лист
						67
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В первой и второй главе рассмотрены основные способы преобразования параметров электроэнергии и устройства для управления режимами сети, их достоинства, недостатки, принцип действия, область применения, рассмотрено инновационный элемент для управления режимами сети - малогабаритное устройство продольной компенсации. Далее, в третьей главе проведён анализ длительных режимов сети и регулирование послеаварийного режима района сети с помощью МУПК.

					13.03.02.2017.185.00 ПЗ	Лист
						68
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию: в 2 т. / под ред. А.А. Федорова - М.: Энергоатомиздат, 1986 - 320 с.
2. Устройства и технологии управления линиями переменного тока. - http://www.ntc-power.ru/innovative_projects/devices_and_technology_management_lines_of_alternating_current_facts/.
3. Справочник по проектированию электрических сетей / Файбисович Д.Л., Шапиро И.М. Карапетян И.Г.; под редакцией Д.Л.Файбисовича. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2006. – 320 с.
4. Асташев, М.Г. Применение двухтактного преобразователя в малогабаритном устройстве распределённой продольной компенсации для воздушных линий электропередачи / Асташев М.Г., Панфилов Д.И., Рашитов П.А., Рожков А.Н. // Известия РАН. Энергетика. - 2016. - №4.
5. Асташев, М.Г. Анализ режимов работы автономного последовательного регулятора потоков мощности для воздушных линий электропередачи / Асташев М.Г., Панфилов Д.И., Серегин Д.А., Чернышев А.А. // Известия РАН. Энергетика. - 2017. - №1.
6. Электроэнергетические системы и сети: учебное пособие по курсовому проектированию / А.В. Коржов. - Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2012. - 71 с.
7. Передача и распределение электрической энергии: учебное пособие для самостоятельной работы студентов / Е.Д. Комиссарова, А.В. Коржов; под ред. Е.Д. Комиссаровой. - Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007. - Ч. 1. - 140с.
8. Кочкин, В.И. Применение статических компенсаторов реактивной мощности в электрических сетях энергосистем и предприятий / Кочкин, В.И., Нечаев О.П. - М.: Изд-во НЦ ЭНАС. - 248 с.
9. Забродин, Ю.С. Промышленная электроника: учебник для вузов / Забродин Ю.С. - М.: Изд-во высш. школа, 1982. - 496 с.

					13.03.02.2017.185.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		69

10. Элементы на базе силовой электроники для управления режимами электроэнергетической системы: учебное пособие к лабораторным работам / М.Е. Гольдштейн, А.В. Прокудин; под ред. М.Е. Гольдштейна. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2016. – 117 с.
11. Кочкин, В.И. Новые технологии повышения пропускной способности / В.И. Кочкин // Новости ЭлектроТехники. - 2007. - №4.
12. Рыжов, Ю.П. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения: учебник для вузов / Ю.П. Рыжов. - М.: Изд-во МЭИ, 2007. - 488 с.
13. Родионов, В. Г. Энергетика: проблемы настоящего и возможности будущего / В. Г. Родионов. – М. : Изд-во ЭНАС, 2010. – 352 с.
14. Кобец, Б. Б. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid / Кобец Б. Б., Волкова И. О. - М.: Изд-во ИАЦ Энергия, 2010.-88 с.
15. Бурман, А.П. Управление потоками электроэнергии и повышение эффективности электроэнергетических систем: учебное пособие / Бурман А.П., Розанов Ю.К., Шакарян Ю.Г. – М.: Изд-во МЭИ, 2012.-254 с.

					13.03.02.2017.185.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		70

ПРИЛОЖЕНИЕ А

СОКРАЩЕНИЯ

1. ПН – преобразователь напряжения.
2. УПК – устройство продольно компенсации.
3. МУПК – малогабаритное устройство продольной компенсации.
4. АИН – автономный инвертор напряжения.
5. п/ст – подстанция
6. ЛЭП – линия электропередач.
- 7.ЭС – электростанция.
8. БУ – балансирующий узел.
9. ВЛ – воздушная линия.
10. ГЭС – гидроэлектростанция.
11. FACTS – Flexible Alternative Current Transmission Systems.
12. РПН – регулировка под напряжением.
13. TVA – tennessee valley authority.
14. EPRI – electric power research institute.
15. АО – акционерным обществом.
16. ВНИИЭ – всесоюзный научно-исследовательский институт электроэнергетики.
17. ШИМ – широтно-импульсная модуляция.
18. СТК – статический тиристорный компенсатор.
19. МГД – магнитогидродинамический.

									Лист
									71
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2017.185.00 ПЗ				

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

МАТЕРИАЛ ИЗ ПРЕЗЕНТАЦИИ



Рисунок Б.1 – Внешний вид шкафов тиристорного преобразователя (инвертора) и системы управления СТАТКОМ



Рисунок Б.2 – Фото одной фазы преобразователя

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.03.02.2017.185.00 ПЗ

Лист

72

Продолжение приложения Б



Рисунок Б.3 – Общий вид установки



Рисунок Б.4 – СТАТКОМ на ПС 220 кВ Могоча в Забайкальском крае

Продолжение приложения Б



Рисунок Б.5 – Внешний вид установок продольной компенсации

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.03.02.2017.185.00 ПЗ

Лист

74

Продолжение приложения Б



Рисунок Б.6 – Устройство технологии SmartWire, установленное на ЛЭП, США

Таблица Б.1 – Анализ работы ветви ЛЭП 16-8

№	Марка провода	Длительно-допустимый ток (А)	Max (А)	Min (А)	п/а режим (А)	п/а с применением МУПК (А)
16-8	АС 70/11	265	162	186	319	190

					13.03.02.2017.185.00 ПЗ	Лист
						76
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		