

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМ. Н. И. ВАВИЛОВА»

*На правах рукописи*

**Зиниев Шамсудин Зелимович**

**СНИЖЕНИЕ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СЕЛЬСКИХ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1000 В  
ПРИМЕНЕНИЕМ УСТРОЙСТВ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ  
МОЩНОСТИ НА ПОЛЯРНЫХ КОНДЕНСАТОРАХ**

Специальность 05.20.02 – Электротехнологии  
и электрооборудование в сельском хозяйстве

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Научный руководитель:**  
доктор технических наук,  
профессор Ерощенко Г. П.

Саратов – 2017

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК СЕТЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ И СПОСОБОВ СНИЖЕНИЯ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ.....	8
1.1. Характеристика парка сельскохозяйственных электроприводов.....	8
1.2. Потери мощности в элементах системы сельской электрификации.....	14
1.3. Реактивная мощность в сетях сельскохозяйственного назначения.....	21
1.4. Анализ потерь электрической энергии и способов их снижения в сельских электрических сетях.....	25
1.5. Постановка задач исследования.....	34
2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛЯРНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ В СЕТЯХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ.....	38
2.1. Методика исследования.....	38
2.2. Обоснование объекта исследования.....	41
2.3. Требования к средствам компенсации реактивной мощности.....	44
2.4. Теоретическое обоснование рационального типа конденсатора.....	47
2.4.1. Электролитические конденсаторы полярные.....	49
2.4.2. Электролитические конденсаторы неполярные.....	51
2.5. Выбор схемы включения полярных конденсаторов.....	56
2.6. Обоснование места включения конденсаторных установок.....	59
2.7. Устройство целевой компенсации реактивной мощности.....	64
2.8. Выводы по главе.....	67
3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИМИ КОНДЕНСАТОРАМИ.....	69
3.1. Программа испытаний.....	69
3.2. Описание экспериментальной установки.....	71

3.2.1.	Описание установки проверки УКПК в трехфазном режиме.....	71
3.2.2.	Описание схем исследования при пуске асинхронного электродвигателя в программе MATLAB-SIMULINK.....	79
3.3.	Проверка работы устройства в однофазном режиме.....	84
3.4.	Компенсация реактивной мощности в схемах с трехфазными асинхронными двигателями.....	90
3.5.	Выводы по главе.....	98
4.	АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА.....	99
4.1.	Статистическая обработка результатов повышения коэффициента мощности.....	99
4.2.	Проверка теоретических и экспериментальных данных.....	102
4.3.	Нагревостойкость полярных конденсаторов.....	103
4.4.	Режимы использования полярных конденсаторов.....	107
4.5.	Результаты динамической компенсации реактивной энергии при пуске асинхронного двигателя .....	111
4.6.	Выводы по главе.....	116
5.	ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ.....	117
5.1.	Методика расчета.....	117
5.2.	Затраты на устройство компенсации реактивной мощности.....	119
5.2.1.	Затраты на создание устройства.....	119
5.2.2.	Затраты на эксплуатацию устройства.....	122
5.3.	Расчет результатов применения компенсирующего устройства.....	123
5.4.	Оценка экономической эффективности УКПК для сети 0,4 кВ.....	130
5.5.	Выводы по главе.....	132
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	133
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	135
	ПРИЛОЖЕНИЯ.....	148

## ВВЕДЕНИЕ

Доля стоимости электрической энергии в общей стоимости товарного сельскохозяйственного продукта возрастает из-за непрерывного роста тарифа. А если учесть условия электрификации сельскохозяйственного производства (значительная протяженность линий электропередач, неустойчивый и малозагруженный график работы, сезонные колебания мощности, изношенное оборудование и т.п.), то затраты на электроэнергию являются основными в ценообразовании товарного продукта. Это обостряет проблемы энергосбережения. Доля технических потерь энергии в сельских электрических сетях напряжением до 1000 В составляет 20...25 %. Половина из них обусловлена низким коэффициентом мощности, то есть потреблением реактивной мощности, которая значительно ухудшает характеристики сетей, поэтому становится важным компенсировать потребление реактивной мощности в сельских электрических сетях до 1000 В на новом техническом уровне [5,7,18].

Электротехническая промышленность освоила выпуск новых высокоэффективных полярных конденсаторов, которые могут заменить не оправдавшие себя бумажные конденсаторы [1,22,34]. Однако такая замена сдерживается из-за малой изученности применения полярных конденсаторов в сельских сетях переменного тока.

Работа выполнялась в соответствии с Государственной программой Российской Федерации «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года» и приоритетным научным направлением развития СГАУ им. Н.И. Вавилова по теме «Модернизация инженерно-технического обеспечения АПК» (регистрационный номер 01201151795).

**Степень разработанности темы исследования.** Проблема компенсации реактивной мощности принята к рассмотрению И. А. Будзко, А. А. Глазуновым, Л. Г. Прищепом. В дальнейшем она изучалась И. Ф. Бородиным, Т. Б. Лещинской, А. В. Богданом, В. А. Кобозевым, С. А. Шишкиным, С. А. Некрасовым и др. Аналитическим и экспериментальным исследованием

снижения потерь электроэнергии посвящены работы Р. Г. Мугаметова, А. А. Пястолова, Г. П. Ерошенко, М. А. Юндина, А. Э. Кравчика, И. В. Евстифеева, С. В. Оськина, И. И. Артюхова, С. Ф. Степанова, А. Г. Сошинова и др. Несмотря на большую работу, задача оптимального выбора конденсаторов, а также использование полярных конденсаторов в качестве компенсирующих устройств остается не решенной. В диссертационном исследовании рассмотрено:

- снижение потерь электроэнергии от реактивной мощности;
- разработка методики выбора рационального типа конденсатора;
- внедрение эффективных полярных конденсаторов в качестве устройств индивидуальной компенсации реактивной мощности.

**Цель работы** – снижение потерь электроэнергии в сельских электрических сетях напряжением до 1000 В за счет обоснования и применения устройства компенсации реактивной мощности на полярных конденсаторах.

**Задачи исследования:**

- выполнить анализ характеристик электрических сетей напряжением до 1000 В сельскохозяйственного назначения и обосновать объект исследования;
- обосновать выбор конденсаторов в условиях неопределенности и разработать схемы включения устройства компенсации реактивной мощности на полярных конденсаторах (УКПК);
- исследовать работоспособность полярных конденсаторов в цепях переменного тока в однофазном и трехфазном режимах, определить уровень повышения коэффициента мощности;
- оценить экономическую эффективность внедрения УКПК в качестве индивидуальной компенсации реактивной мощности.

**Объект исследования** – сельская электрическая сеть напряжением до 1000 В с бытовой, производственной и смешанной нагрузкой.

**Предмет исследования** – закономерности влияния параметров сети (коэффициент мощности, реактивная мощность, эксплуатационные затраты) на выбор устройств компенсации реактивной мощности.

**Научная новизна** диссертационного исследования заключается в

следующем:

- разработана методика выбора конденсаторов в условиях неопределенности;
- выявлена закономерность влияния параметров конденсатора на стоимость электроэнергии;
- обоснована работоспособность полярных конденсаторов в электрических сетях переменного тока напряжением до 1000 В для компенсации реактивной мощности.

Новизна технического решения защищена патентом РФ (№ 158228).

#### **Теоретическая и практическая значимость работы:**

- определена оценочная функция выбора типа конденсатора в условиях неопределенности;
- для сельских электрических сетей напряжением до 1000 В определено выражение по расчету емкости на основе многоступенчатого временного графика загрузки;
- обоснована оптимизация параметров конденсаторов по критерию суммарной минимальной стоимости.
- созданы экспериментальные установки УКПК для работ в однофазном и трехфазном режимах;
- результаты исследования внедрены в учебный процесс кафедры «Инженерная физика, электрооборудование и электротехнологии» ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ по дисциплине «Электроснабжение» и ФГБОУ ВО ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова по дисциплине «Электрические машины и трансформаторы»;
- результаты диссертационной работы приняты к внедрению на предприятии ООО «Беркут-Агро».

**Методология и методы исследований.** В работе использованы теория принятия решений в условиях неопределенности и активное планирование экспериментальных исследований, метод математической статистики. В экспериментальных исследованиях использованы современные средства измерительной техники.

**Положения, выносимые на защиту:**

- характеристики электрических сетей сельскохозяйственного назначения по структуре и линейной плотности нагрузки, обеспечивающие возможность классификации воздушных линий напряжением до 1000 В.
- алгоритм и методика выбора конденсаторов в условиях неопределенности по типу, параметрам, схем и мест их включения;
- данные о проверке работоспособности полярных электролитических конденсаторов в сети переменного тока напряжением до 1000 В;
- результаты экспериментальных исследований применения УКПК для АД мощностью 2,2 кВт.

**Степень достоверности и апробация результатов** подтверждается достаточной сходимостью расчетных и экспериментальных данных, полученных в лабораторных и производственных условиях.

Основные положения и результаты работы докладывались, обсуждались и получили одобрение на III–VI международных научно-практических конференциях «Актуальные проблемы энергетики АПК» (Саратов, 2012- 2015); на III Всероссийской научно-практической конференции «Молодежь, наука, инновации» (Грозный, 2014); на V Всероссийском форуме компьютерных технологий и коммуникаций (Грозный, 2014); на Международном форуме молодых промышленников и энергетиков «Форсаж – 2015» (г. Обнинск, Калужская область, 2015); на Конкурсе прорывных проектов в области интеллектуальной энергетики «Энергопрорыв – 2015» (Москва, 2015).

Результаты исследований опубликованы в 11 научных статьях на 3,45 печ. листах, из которых 1,41 печ. листа личная доля автора, в том числе 3 статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК. Получен патент РФ на полезную модель RU 158228.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающей в себя 122 наименований, и 4 приложений. Основное содержание работы изложено на 154 страницах текста, содержит 41 таблицу, 30 рисунков.

# 1. АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК СЕТЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ И СПОСОБОВ СНИЖЕНИЯ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

## 1.1 Характеристика парка сельскохозяйственных электроприводов

Среди факторов, влияющих на величину потерь электроэнергии, важное значение имеют характеристики и структура потребителей электрической энергии, а также характеристики элементов электроснабжения.

По количеству, номенклатуре и установленной мощности электрооборудования сельское хозяйство занимает ведущее место среди других отраслей. Номенклатура электрооборудования, используемого в сельском хозяйстве, составляет более 300 наименований [7,31,43,74]. Электродвигатели составляют около 200 типоразмеров, а их общее количество превышает 10 млн. шт. Электронагревательные установки составляют почти 40 наименований, электроосветительные установки более 50 и т.д. [31,43,74]. В таблице 1.1 представлены суммарные показатели парка электрооборудования [31,43,74]. Хотя эти значения заметно меняются со временем, они позволяют оценить особенности электропотребления в сельском хозяйстве.

Таблица 1.1 - Основные показатели парка электрооборудования

Вид электрооборудования	Удельный вес, %		
	Число	Установленная мощность	Потребленная энергия
Электроприводы	19	70	64
Электронагревательные установки	2	20	24
Электроосветительные установки	77	6	8
Прочее оборудование	2	4	3

Первое место по всем показателям занимают электроприводы. Это массовое и энергоемкое оборудование в сельском хозяйстве. Следовательно, по ним можно оценивать уровень потерь электроэнергии и выбирать способы их сокращения.

В электроприводах сельскохозяйственного назначения применяют обычно асинхронные двигатели с короткозамкнутой обмоткой ротора. Наибольшее распространение имеют двигатели мощностью от 1 до 3 кВт. И частотой вращения  $1500 \text{ об/мин}^{-1}$  [9,31,74]. Около 50 % двигателей используют в животноводстве, 30 % - растениеводстве, 20 % - в подсобное предприятие. В последние годы расширилось применение специальных электродвигателей по исполнению, с регулированием вращения и др.

Для решения проблемы экономии электроэнергии представляет интерес структура парка электродвигателей, которая приведена в таблице 1.2.

Таблица 1.2 - Структура парка электродвигателей (% от общего числа)

Частота вращения, $\text{мин}^{-1}$	Мощность, кВт						Всего
	до 1,0	1,1...3,0	3,1...5,0	5,1...10,0	10,0...20,0	Более 20,0	
3000	1	6	2	1,8	1	1,2	13
1500	5	35	13	11	2	2	68
1000	1	7	5	4,2	1	0,8	19
Всего	7	48	20	17	4	4	100

Структура типоразмеров двигателей, применяемых в различных отраслях, отличается незначительно и соответствует средним данным.

Парк двигателей разделяется по сериям, исполнениям и модификациям. Выборочные обследования показывают, что удельный вес старых серий еще достаточно высокий. Так, на двигатели первой (А) и второй (А2) серий приходится около 50 % от общего числа.

В сельском хозяйстве применяют двигатели новой единой серии 4А и АИ. В них используют новую холоднокатаную электротехническую сталь, современные электроизоляционные материалы, специальные шариковые подшипники с постоянно заложенной смазкой. Такие двигатели по сравнению со старой серией облегчены на 19 % , а КПД повышен на 1 %. Основное достоинство таких двигателей - повышенная надежность. Четвертая серия имеет двигатели основного исполнения, модификация по электрическим,

конструктивным, климатическим и другим параметром, а также узкоспециализированные исполнения, в том числе и для сельского хозяйства.

Двигатели серии 4А сельскохозяйственного назначения выполняют на базе двигателей основного исполнения мощностью от 0,12 до 30 кВт, с синхронной частотой вращения 3000, 1500 и 1000  $\text{мин}^{-1}$ . Они имеют закрытое обдуваемое исполнение (IP44), чугунные корпуса и подшипниковые щиты. Коробки выводов выполнены двухштуцерными с уплотнением для предотвращения попадания влаги. Для присоединения к сети предусмотрены клеммные колодки. Конструкция двигателей позволяет пополнять смазку подшипниковых узлов без разборки, а в двигателях с высотой оси вращения до 132 мм применены подшипники, не требующие пополнения или замены смазки во время всего срока службы.

В двигателях сельскохозяйственного назначения применены обмоточные и установочные провода, пропиточные, лакокрасочные и антикоррозионные материалы, обеспечивающие нагревостойкость по классу В (130 °С), стойкость к воздействию повышенной влажности, агрессивных сред животноводческих помещений, дезинфицирующих растворов и аэрозолей. Они могут работать при температуре окружающей среды от -45 до +45 °С, допускают длительную работу на пониженном на 20 % напряжении со снижением паспортной мощности на 15 %. Расчетный срок службы двигателей 8...10 лет, но не менее 12 000 ч при работе двигателя в среднем 1500 ч/год.

Рассмотрим условия использования электрического оборудования на примере наиболее распространенного – силовых трансформаторов и асинхронных электродвигателей. Одна из основных особенностей эксплуатации силовых трансформаторов сельских потребительских подстанций – асимметрия фазных токов:

- неслучайная, возникающая из-за неравномерного распределения однофазных токоприемников, которую можно относительно легко устранить;
- случайная (вероятная), вызванная случайными включениями однофазных потребителей, устранить которую практически невозможно.

Анализ статистических данных показывает, что с увеличением мощности трансформатора не симметрия токов по фазам уменьшается. Однако относительный рост однофазной осветительной нагрузки, и появление однофазной силовой нагрузки (сварочные трансформаторы, электроводонагреватели, электрифицированный инструмент, бытовые приборы и т.д.) оставляют равномерность нагрузки по фазам очень высоким [7,10,16].

Исследования показывают, что среднее значение асимметрии токов лежит в пределах от 32 до 50 %. Асимметрия токов приводит к искажению напряжений по фазам, что отрицательно сказывается на работе всех токоприемников и линий:

- резко сокращается срок службы источников света, подключенных к фазе с увеличенным напряжением, уменьшается светоотдача тех, которые подключены к фазе с пониженным напряжением;

- увеличиваются ток намагничивания и потери в стали и обмотках и резко снижается  $\cos\phi$  однофазных силовых токоприемников (например, сварочных трансформаторов), подключенных к повышенному напряжению;

- увеличиваются потери в линиях и трансформаторе.

При относительно небольшой мощности трансформаторов асимметрия токов вызывает изменение и линейных напряжений, что приводит к возрастанию потерь в трехфазных электродвигателях, уменьшению их КПД и развиваемых ими моментов. Особенно резко проявляется отрицательное действие асимметрии токов в наиболее распространенных в сельском хозяйстве трансформаторах, имеющих 0 (12) группу соединений обмоток (Y/Y<sub>0</sub>).

Трансформаторы новых серий с алюминиевыми обмотками и сердечниками из холоднокатаной стали имеют увеличенное в среднем в 1,5 раза сопротивление нулевой последовательности по сравнению с аналогичным сопротивлениями трансформаторов старых серий с медными обмотками и сердечниками из горячекатаной стали. В них пропорционально возрастает искажение напряжений по фазам при одной и той же асимметрии токов. Таким образом, асимметрия токов должна быть ограничена для трансформаторов последних серий. Поэтому электротехническая промышленность в

ограниченном количестве выпускает трансформаторы I и II габаритов специально для сельского хозяйства с группами соединения обмоток «звезда-зигзаг с нулем» и «треугольник-звезда с нулем». Они позволяют обеспечить высокое качество напряжения при асимметрии токов по фазам. Например, для трансформатора мощностью 100 кВА старой серии сопротивление нулевой последовательности примерно в 10 раз больше сопротивления короткого замыкания, для такого же трансформатора новой серии оно больше в 17 раз, а для трансформаторов с соединением обмоток «треугольник» и «зигзаг» оно равно сопротивлению короткого замыкания [27,32].

Вторая особенность эксплуатации трансформаторов сельских подстанций - резко переменный суточный график нагрузки, наличие в нем утреннего и вечернего максимумов, некоторый провал нагрузки в дневное время и практически отсутствие нагрузки в ночное время. Поэтому по сравнению с трансформаторами городских сетей, имеющими нормальную загрузку, среднесуточная загрузка трансформаторов сельскохозяйственного назначения (сельских трансформаторов) составляет 0,2...0,4 от номинальной, и тенденций к ее повышению пока не наблюдается.

Статистика показывает, что большая часть трансформаторов выходит из строя не зимой в период максимальной нагрузки, а летом. Происходит это потому, что на нагрев трансформатора влияет не только его нагрузка и значение подводимого напряжения, но и температура окружающей среды, причем влияние последней оказывается очень значительным.

В различных отраслях сельскохозяйственного производства режимы работы электродвигателей неодинаковы. Они наиболее легкие в мастерских и подсобных предприятиях, более тяжелые в растениеводстве и наиболее тяжелые в животноводстве. Температура среды животноводческих помещений, как правило, не превышает 15 °C (288 K) и благоприятна для работы электродвигателей, что позволяет допускать при необходимости определенную их перегрузку.

Наблюдения показали, что в животноводстве электродвигатели, как правило, работают с недогрузкой. Это относится к приводам центробежных

насосов, доильных установок типа «карусель», вакуум-насосов, кормораздатчиков и транспортеров для уборки навоза. У электродвигателей, работающих с недогрузкой, снижаются  $KПД$  и  $\cos\varphi$ . Электродвигатели серии 4А имеют запас по температуре нагрева. Согласно техническим условиям, у электродвигателей серии АИР запас по температуре нагрева 20...30 °С. Этот запас также позволяет допускать при необходимости перегрузку электродвигателей без снижения срока их службы (по нагревостойкости изоляции).

Сезонность и односменность работы электроприводов, характерные для сельскохозяйственного производства, определяют относительно низкую степень использования установленного электрооборудования как в течение суток, так и на протяжении года. В разных отраслях производства электродвигатели также используются неодинаково. Например, по-разному используются электродвигатели в мастерских и других подсобных предприятиях. Наждачные и сверлильные, а часто токарные, фрезерные и долбежные станки работают в кратковременном режиме, часть станков работает в повторно-кратковременном режиме, а электродвигатели вентиляторных установок работают в длительном режиме. Различные пилорамы и деревообрабатывающие станки работают в повторно-кратковременном режиме. На зернотоках часть электродвигателей, например, привод опрокидывателя автотранспорта, работает кратковременно, часть электродвигателей работает в повторно-кратковременном режиме, а большая часть в длительном и часто в две, три смены[12].

подавляющая часть электродвигателей в животноводстве установлена на раздаче кормов, дойке и уборке навоза и работает в кратковременном режиме. Только в мастерских и подсобных предприятиях электродвигатели работают на протяжении всего года. В животноводстве они очень часто используются только в стойловой период. В растениеводстве, на орошении электродвигатели работают только два - три месяца, а на зерноочистке, всего несколько недель. Исследования показали, что использование электродвигателей по времени в течение суток, по основным процессам животноводства (кормоприготовление,

кормораздача, уборка навоза, доение) составляет 0,17 а с учетом вентиляции и водоснабжения – 0,25 и в целом по сельскохозяйственному производству тоже 0,25. Большинство электродвигателей работает кратковременно - только в течение четвертой части суток с несколькими включениями за этот период.

Следует учесть, что на всех кратковременных процессах, как правило, установлены электродвигатели общепромышленного исполнения, рассчитанные на длительную работу при номинальной нагрузке. Малая продолжительность использования электродвигателей позволяет допускать их перегрузки без ущерба для сроков службы. Однако длительность использования электродвигателей тесно связана с явлениями тепло и влагообмена, между изоляцией электродвигателя и окружающей средой.

Таким образом, асинхронные электродвигатели с короткозамкнутой обмоткой ротора составляет около 70 % от всей мощности электропотребителей. Они потребляют до 65 % суммарной электроэнергии отрасли. Технологические особенности использования двигателей таковы, что они имеют неполную, резкопеременную нагрузку с суммарной продолжительностью примерно 800 ч в год. Всё это позволяет предположить о низком уровне электрических показателей ( $KПД$  и  $\cos\phi$ ) и о повышении потерях энергии в электрических линиях и трансформаторах. Поэтому для повышения эффективности электрификации сельского хозяйства необходимо разрабатывать способы снижения потерь мощности и энергии.

## **1.2 Потери мощности в элементах системы сельской электрификации**

В общем случае потери энергии в каком-либо элементе сети – это разность между подведенной и полученной энергией. При рассмотрении проблемы потерь в сельской электрической сети используют официальное определение: потери – это разность между показаниями электросчетчика на передающей энергию стороне и электросчетчика на стороне принимающей ее.

Для решения проблемы потерь важно выделить объект изучения. Дело в том, что сельские электроприемники подключены к сети по разнообразным

схемам. Их анализ показывает возможность выделить общие черты. Например, каждое сельскохозяйственное предприятие подключено к централизованной сети через масляные трансформаторы 10/0,4 мощностью от 63 до 1000 *кВА*. На одно предприятие приходится от 1 до 20 трансформаторов. От каждого из них отходят воздушные линии напряжением 0,4 *кВ* (ВЛ 0,4). В среднем таких линий 3, хотя могут быть случаи, когда их число изменяется от 1 до 5. Очень разнообразна протяженность таких линий. Среднюю величину протяженности следует определять применительно к каждому региону. На ВЛ 0,4 *кВ* используют обычно алюминиевые провода сечением от 16 до 70 *мм*<sup>2</sup>. В последнее время чаще применяют провода типа СИП [63].

Таким образом, объектом изучения служит подстанция 10/0,4 с тремя отходящими линиями, содержащими однофазные и трехфазные потребители. Для такой схемы требуется определить виды и размер потерь и определить рациональные способы их снижения [20,22].

В литературе встречается разнообразная классификация потерь. Прежде всего, выделяют потери мощности и энергии. По месту происхождения: потери в трансформаторе, в электрической линии, в электродвигателе и т.д. По зависимости от мощности: постоянные и переменные потери.

Из электротехники известно, что передача электроэнергии осуществляется электромагнитным полем проводника. При этом часть энергии теряется в проводнике. Физический смысл этого явления состоит в следующем. Под действием приложенного напряжения свободные электроны перемещаются вдоль проводника. На пути они сталкиваются с другими электронами или узлами кристаллической решетки. Длина пробега сокращается, а энергия превращается в теплоту. Отсюда вытекает физический смысл понятия «потери электроэнергии». Величина потерь зависит от материала проводника и силы тока. Такие потери называют переменными или нагрузочными.

Переменное электромагнитное поле для ферромагнитных материалов служит источником потерь энергии на перемагничивание «доменов», из которых состоят эти материалы. Такие потери называют магнитными или постоянными тока «холостого хода» сети.

Нагрузочные потери и потери холостого хода составляют технические (физические) потери. Они определяются конструктивными параметрами звеньев сети и физическими процессами, протекающими в них.

По параметрам звеньев и режимам их работы можно рассчитать потери. Это расчетные потери холостого хода, нагрузочные потери и их суммарное значение.

В эксплуатационной практике используют понятие отчетных потерь. Отчетные потери это разность показаний электросчетчиков, учитывающих энергию, поступившую в сеть и полезно отпущенную потребителям[35].

Разность расчетных и отчетных потерь энергии представляет собой коммерческие потери или небаланс. Его значение зависит от многих факторов: точности расчетов, точности счетчиков, несанкционированного подключения потребителей и т.д.[35]

**Потери в трансформаторах.** Основными элементами трансформатора служат: 1 – обмотки, 2 – магнитопровод. Как отмечалось ранее, трансформаторы очень разнообразны по мощности, напряжению, исполнению и т.д. В сетях сельскохозяйственного назначения используются масляные трансформаторы напряжением 10/0,4 кВ мощностью от 63 до 1000 кВА.

В трансформаторе происходят следующие потери мощности:

- потери активной мощности на нагревание обмоток  $P_k$ , зависит от квадрата тока нагрузки;
- потери активной мощности в магнитопроводе  $P_x$ , не зависящие от нагрузки;
- потери реактивной мощности на рассеяние магнитных потоков  $Q_k$ ;
- потери реактивной мощности на намагничивание  $Q_x$ .

Перечисленные составляющие рассчитывают по следующим выражениям:

$$P_k = P_{k.H} (S/S_H)^2, \quad (1.1)$$

$$P_x = P_{x.x}, \quad (1.2)$$

$$Q_k = Q_{k.H} (S/S_H)^2, \quad (1.3)$$

$$Q_x = I_{x.x} S_H / 100, \quad (1.4)$$

где  $P_{к.н}$  – потери короткого замыкания при номинальной нагрузке,  $кВт$ ;  $P_{х.х}$  – потери холостого хода при номинальном напряжении,  $кВт$ ;  $Q_{м.н}$  – потери реактивной мощности (рассеивание),  $кВар$ ;  $Q_{х.х}$  – потери реактивной мощности намагничивания,  $кВар$ ;  $S, S_n$  – полная текущая и номинальная мощность,  $кВА$ ;  $I_{х.х}$  – ток холостого хода,  $A$ .

В эксплуатационной практике потери в трансформаторе определяют по паспортным данным трансформатора  $P_T$

$$P_T = P_{х.х} + P_{к.н} (S/S_n)^2. \quad (1.5)$$

Потери электроэнергии в трансформаторе  $W_T$ , включенном в сеть в течение года

$$W_T = P_{х.х} T + P_{к.н} (S/S_n)^2 \tau, \quad (1.6)$$

где  $T = 8760$  ч – число часов в году;  $\tau$  – время потерь, зависящее от графика нагрузок, ч.

Составляющие потерь некоторых трансформаторов приведены в таблице 1.3, 1.4.

Таблица 1.3 – Характеристики трансформаторов старых серий

Тип трансформатора	Потери, $кВт$		$I_{х.х}, \%$
	$P_x$	$P_k$	
ТМ 10/10	0,73	2,4	7
ТМ 180/10	1,2	4,1	7
ТМ 320/10	1,9	6,2	7
ТМ 560/10	2,5	9,4	6
ТМ 1000/10	4,9	15	5

Таблица 1.4 - Характеристики трансформаторов новых серий

Тип трансформатора	Потери, $кВт$		$I_{х.х}, \%$
	$P_x$	$P_k$	
ТМ 10/10	0,065	2,80	4
ТМ 160/10	0,40	2,65	4,5
ТМ 250/10	0,55	3,70	5
ТМ 400/10	0,80	5,40	4,5
ТМ 630/10	1,01	7,60	5,5
ТМ 1000/10	1,40	10,6	5,5

**Потери в электродвигателях.** В сельском хозяйстве применяют асинхронные двигатели с обмоткой ротора замкнутой накоротко мощностью от 1 до 100 кВт. За вековую историю существования они прошли большой путь развития и стали передовой техникой электромашиностроения. Однако не удастся исключить потери в двигателях. В результате происходящих в них электромагнитных и механических процессов возникают потери, которые условно разделяют на следующие группы: механические, магнитные, электрические и добавочные [25].

Механические потери на трение о воздух (вентиляционных) складываются из потерь на трение в подшипниках.

Потери магнитные разделяют на перемагничивание, на гистерезис и на вихревые токи. Величины этих потерь определяются уровнем развития техники. Влиять на этот уровень эксплуатационными методами не удастся.

Потери электрические возникают в обмотках при протекании по ним электрического тока. Эти потери зависят от нагрузки двигателя и входят в группу переменных потерь  $P_{\text{пер.}}$ . Механические и магнитные потери относятся к группе постоянных потерь  $P_{\text{пост.}}$ .

Общие потери  $P_{\text{д}}$  рассчитывают по паспортным данным

$$P_{\text{д}} = P_{\text{пост.}} + P_{\text{пер.}} \left( \frac{P}{P_{\text{н}}} \right)^2, \quad (1.7)$$

где  $P$  и  $P_{\text{н}}$  – соответственно фактическая и номинальная мощность электродвигателя, кВт.

Для отдельных двигателей паспортные данные приведены в таблице 1.5.

Таблица 1.5 - Технические данные асинхронных двигателей

Типоразмер	$P, \text{ кВт}$	$n, \text{ об/мин}$	Нагрузка 100 %	
			$\eta, \%$	$\cos\varphi$
1	2	3	4	5
АИР 71В2	1,1	2805	79,5	0,80
АИР 80А2	2,2	2850	83,0	0,87
АИР 90L2	3,0	2850	84,5	0,88
АИР 100L2	5,5	2850	88,0	0,89
АИР 132М2	11,0	2910	88,0	0,90
АИР 80А4	1,1	1395	76,5	0,77
АИР 90L4	2,2	1395	81,0	0,81
АИР 100S4	3,0	1410	82,0	0,82

1	2	3	4	5
АИР 112М4	5,5	1430	86,0	0,86
АИР 132М4	11,0	1450	88,5	0,85
АИР 80В6	1,1	920	75,0	0,74
АИР 100L6	2,2	945	81,5	0,74
АИР 112АМ6	3,0	950	81,5	0,76
АИР 132S6	5,5	960	85,0	0,80
АИР 160S6	11,0	970	88,0	0,83

Таблица 1.6 – Основные характеристики электродвигателей

Марка электродвигателя	АИР 71В2	АИР 80А2	АИР 90L2	АИР 100L2	АИР 132М2	АИР 80А4	АИР 90L4	АИР 100S4	АИР 112М4
Мощность, кВт	1,1	2,2	3,0	5,5	11,0	1,1	2,2	3,0	5,5
$\cos \phi$ на холостом ходу	0,23	0,25	0,27	0,31	0,32	0,19	0,20	0,23	0,24
$\cos \phi$ под нагрузкой	0,80	0,87	0,88	0,89	0,90	0,77	0,81	0,82	0,86

**Потери в линиях электропередачи.** Передача электроэнергии по проводам в электрических линиях связана с потерями активной и реактивной мощностей и энергии [7]. Применительно к линиям сельскохозяйственного назначения потери активной мощности  $P$  в трехфазной сети определяется

$$P = 3(I_a^2 + I_p^2)R = (P^2 + Q^2/U^2)R, \quad (1.8)$$

где  $I_a$ ,  $I_p$  - активный и реактивный ток,  $A$ ;  $R$  - активное сопротивление провода линии,  $\text{Ом}$ ;  $Q$  - реактивная мощность сети,  $\text{kVar}$ ;  $U$  - напряжение сети,  $V$ .

Потери реактивной мощности

$$Q = 3(I_a^2 + I_p^2)X = (P^2 + Q^2/U^2)X, \quad (1.9)$$

где  $X$  - реактивное сопротивление линии,  $\text{Ом}$ .

Потери энергии рассчитывают с учетом графика нагрузок  $S$  и реального тока за период времени  $T$

$$W = 3R \int_0^T I^2 dt = R \int_0^T \frac{S^2}{U^2} dt. \quad (1.10)$$

Для типовых графиков нагрузок используют понятие времени наибольших потерь или просто время потерь  $\tau$  и рассчитывают по выражению

$$W = 3 I^2 R \tau = (S_{\max}^2/U^2)R\tau. \quad (1.11)$$

Для производственных нагрузок  $\tau = 1500 \dots 2000$  ч/год, а для бытовых потребителей  $\tau = 2000 \dots 3000$  ч/год.

Активное сопротивление проводов линии зависит от материала, длины и площади сечения провода

$$R = \rho_{\text{л}} l / S, \quad (1.12)$$

где  $l$  - длина провода, м;  $\rho_{\text{л}}$  - омическое сопротивление 1 км длины ( $\rho = 1,98$  Ом/км для А16;  $\rho = 1,28$  Ом/км для А25;  $\rho = 0,92$  Ом/км для А35;  $\rho = 0,64$  Ом/км для А50;  $\rho = 0,46$  Ом/км для А70).

Индуктивное сопротивление этих проводов линии зависит от геометрических параметров проводов линий и ее длины

$$X = x_{\text{л}} l / S, \quad (1.13)$$

где  $x_{\text{л}}$  - индуктивное сопротивление 1 км линии ( $x_{\text{л}} = 0,4$  - усредненное значение для всех воздушных линий напряжением 0,4 кВ).

Величина потерь мощности зависит от характера распределения нагрузки вдоль линии. Различают сосредоточенную и распределенную нагрузки. Для каждого случая аналитическое вычисление осуществляют по формулам, учитывающим особенности распределения нагрузки. В последнее время расчеты выполняют на ЭВМ.

Анализ приведенных данных свидетельствует о том, что режимы использования электрооборудования, несмотря на их высокие энергетические показатели ( $KПД$  и  $\cos\varphi$ ), являются предпосылками больших потерь электроэнергии. Уже эти факты заставляют рассматривать проблему снижения потерь комплексно, т.е. не только с позиций совершенствования электрооборудования, но и с позиций совершенствования технологии сельскохозяйственного производства. Последнее предполагает увеличение продолжительности и загрузки электрооборудования, более широкое внедрение автоматизации, применение поточных линий и т.п. Однако принципиальные особенности сельскохозяйственной отрасли затруднены на этом направлении. Главная из них обусловлена тем, что во всех процессах сельского хозяйства участвует «биологическое звено», т.е. живой организм (растения и/или животные). Именно они определяют своеобразную суточную, сезонную и

годовую ритмичность выполнения тех либо иных работ, а, следовательно, использование электрооборудования. Все это создает серьезные трудности в разработке и организации способов снижения потерь электроэнергии.

### 1.3 Реактивная мощность в сетях сельскохозяйственного назначения

Нормальная работа электроприемников обеспечивается при потреблении ими как активной, так и реактивной мощности. Активная мощность затрачивается на полезную работу, а реактивная - на создание вращающегося магнитного поля в асинхронных двигателях или переменного магнитного поля в трансформаторах, либо в катушках магнитных пускателей и т.п.

Для передачи активной мощности генератор потребляет первичный энергоноситель. Создание магнитных полей не связано с расходом реактивной мощности, т.е. для покрытия реактивной мощности не требуется расход первичного энергоносителя. Реактивная мощность, один раз возникнув, все время находится в колебательном контуре между генератором и потребителем. Однако передача реактивной мощности в прямом и обратном направлении требует затрат активной мощности (энергии) потребляемых в элементах сети[52,66].

Прогрессивное развитие электроэнергии связано со снижением потребления реактивной мощности. Это приводит к экономии активной мощности, снижению потерь мощности (энергии) в трансформаторах и линиях электропередачи, а также улучшению баланса мощности в энергосистеме.

В цепях переменного тока, как известно, различают полную  $S$ , активную  $P$  и реактивную  $Q$  мощности и соответственно токи  $I$ ,  $I_a$ ,  $I_p$ . Между ними установлены следующие связи:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}, \quad (1.14)$$

$$S = UI; \quad P = UI \cos \varphi; \quad Q = UI \sin \varphi; \quad (1.15)$$

$$\cos \varphi = P/S = I_a/I; \quad \sin \varphi = Q/S. \quad (1.16)$$

Основной характеристикой режима реактивной мощности сети или электроприемника служит коэффициент мощности -  $\cos\varphi$ , который показывает долю активного тока в полном. Если  $\cos\varphi = 1,0$ , то весь ток - активный. Если  $\cos\varphi < 1,0$ , то имеется реактивная составляющая. При индуктивной нагрузке имеется отстающая составляющая тока. При конденсаторной нагрузке - имеется опережающая составляющая тока.

Основными потребителями реактивной мощности в электрических сетях сельскохозяйственного назначения являются асинхронные двигатели. Как видно из таблицы 1.7 они имеют  $\cos\varphi = 0,6 \dots 0,9$ . Довольно большое влияние на эту величину оказывает скорость вращения двигателя. Например, двигатель мощностью  $1,1 \text{ кВт}$ , при частоте вращения  $n = 2805 \text{ мин}^{-1}$ , имеет  $\cos\varphi = 0,8$ , а при  $n = 710 \text{ мин}^{-1}$  только  $\cos\varphi = 0,65$ .

Большое влияние на коэффициент мощности оказывает загрузка двигателя. Так при номинальной нагрузке  $\cos\varphi_n = 0,85$ , при нагрузке 50% -  $\cos\varphi = 0,6$ . Это означает, что при номинальной нагрузке реактивная мощность составляет 75 % активной, при 50% нагрузке потребляемая реактивная мощность превосходит активную в 1,5 раза. Относительное потребление реактивной мощности резко возрастает.

Кроме асинхронных двигателей в сельскохозяйственных предприятиях имеются и другие потребители реактивной мощности - сварочные трансформаторы, пуска-регулирующие аппараты осветительных установок, магнитные пускатели и т.д.

Средний коэффициент мощности по предприятию зависит от объектов электрификации. Для растениеводства, где доля мощности электродвигателей в суммарной мощности составляет около 90 %,  $\cos\varphi = 0,65 \dots 0,75$ . Для животноводства подробные данные приведены в таблице 1.7. Здесь коэффициент мощности также низкий.

Таблица 1.7 - Показатели режимов работы на объектах животноводства

Объекты	Коэффициент загрузки	Средний $\cos\varphi$
1	2	3
Доильные установки	0,82-0,85	0,80-0,82
Кормораздатчики	0,44-0,50	0,68-0,75
Навозоуборочные транспортеры	0,46-0,48	0,70-0,73
Холодильные установки	0,60-0,64	0,75-0,80
Водонагреватели	1,0	1,0
Вентиляционные установки в свинарниках	0,85-0,90	0,82-0,85
Молочное отделение	0,80-0,83	0,80-0,83
Кормоцех	0,50-0,60	0,70-0,75
Коровник	0,70-0,76	0,93-0,96
Свинарник	0,53-0,056	0,73-0,80
Откормочник крупного рогатого скота	0,45-0,48	0,70-0,75
Молокозавод	0,70-0,80	0,80-0,82

Приведенные результаты позволяют сказать, что в сельскохозяйственных электроустановках наименьшее значение коэффициента мощности составляет  $\cos\varphi = 0,70...0,75$ . С энергетических позиций это низкое значение. Оно означает, что каждые 100 кВт активной мощности, потребляемой на производственные нужды в сетях, протекает 88...100 кВА реактивной мощности. При этом полная мощность будет 134...143 кВА. По последнему значению выбирается мощность трансформатора на подстанции 10/0,4 кВ и сечения проводов. Только при активной нагрузке ( $\cos\varphi = 1,0$ ) полная мощность составляет 100 кВА. Все это свидетельствует о негативном влиянии низкого коэффициента мощности на экономические показатели электроэнергетической системы с точки зрения затрат на оборудование. Кроме этого низкий коэффициент мощности резко повышает потери в трансформаторах и низковольтных линиях электропередач.

Коэффициент мощности в сетях только с активной нагрузкой равен 1,0 (лампы накаливания, нагревательные приборы); в сетях со смешанной нагрузкой (двигатели и лампы с преобладанием ПРА)  $\cos\varphi$ , обычно составляет 0,95...0,98; в сетях с применением силовой нагрузки он может снизиться до 0,8...0,7, а иногда до 0,4...0,3.

Коэффициент мощности особенно сильно уменьшается при работе двигателей и трансформаторов на холостом ходу или при большой несимметрии.

Если в сети есть индуктивный ток, мощности генераторов, трансформаторных подстанций и сетей используется не полностью. С уменьшением  $\cos\varphi$  значительно возрастают потери энергии на нагрев проводов и обмоток электрических аппаратов [25,38].

Например, если активная мощность, оставаясь постоянной, обеспечивается током  $100\text{ A}$ , при  $\cos\varphi = 1$ , то с понижением  $\cos\varphi$  до  $0,8$  той же мощности сила тока  $I$  в сети возрастает в  $1,25$  раза ( $I_a = I, I = I_a/\cos\varphi = 100/0,8 = 1,25\text{ A}$ ). Потери на нагрев проводов сети и обмоток генератора (трансформатора)  $P_{\text{нагр}} = I^2R$  с пропорционально квадрату тока, то есть они увеличиваются в  $1,252 \dots 1,56$  раза. При  $\cos\varphi = 0,5$  сила тока в сети при той же активной мощности  $I = 100/0,5 = 200\text{ A}$ , а потери в сети возрастают уже в  $4$  раза. Повышаются потери напряжения в сети, что нарушает нормальную работу других потребителей. Счетчик потребителя во всех случаях отсчитывает одно и то же количество расходуемой активной энергии в единицу времени, но в последнем случае генератор дает в сеть ток, сила которого в  $2$  раза больше, чем в первом. Нагрузка же генератора (тепловой режим), определяется не активной мощностью потребителей, а полной мощностью ( $\text{kVA}$ ), то есть произведением напряжения на силу тока, протекающего по обмоткам.

Следует помнить и о том, что при низком  $\cos\varphi$  потери в сети могут стать недопустимо большими, что вызовет необходимость замены проводов проводами увеличенного сечения, то есть приведет к перерасходу дорогостоящего металла и средств.

Таким образом, коэффициент мощности является важным показателем эффективности электрических сетей. Поэтому его значение регламентировано на уровне  $\cos\varphi = 0,95$ . В реальных условиях можно ожидать понижение значения коэффициента мощности. Систематический учет этого показателя отсутствует. Важно организовать хотя бы периодическую проверку

коэффициента мощности на объектах, где по паспортным данным можно ожидать его пониженное значение.

#### 1.4 Анализ потерь электрической энергии и способов их снижения в сельских электрических сетях

Развитие электрификации увеличивает потребление электроэнергии в сельском хозяйстве. Вместе с тем постоянно увеличивается тариф и общие затраты на электроэнергию. Это приводит к росту себестоимости сельскохозяйственной продукции и снижению эффективности предприятий. Поэтому снижение энергозатрат является актуальной задачей сельских электриков.

На этом пути первоочередная роль отводится снижению потерь электроэнергии. Эта цель достигается за счет многих способов. Для электротехнических служб в последние годы показатель потерь энергии является отчетным. Однако данные по итоговым потерям нельзя признать строго достоверными. Для однотипных предприятий этот показатель в отчетах изменяется от 10 до 50 %. Поэтому более точная оценка потерь является первоочередным условием для успешного решения задачи снижения потерь электроэнергии.

Потери происходят во всех элементах системы электроснабжения. Сельские электротехнические службы отчитываются лишь за потери в трансформаторах 10/0,4 кВ и линиях 0,4 кВ (когда они находятся на балансе предприятия).

Структура потерь мощности и энергии в отдельных элементах приведена в таблице 1.8.

Таблица 1.8 - Потери мощности и энергии в элементах электрической системы, %

Элементы системы	Потери энергии			Потери мощности		
	Линии	Трансформаторы	Всего	Линии	Трансформаторы	Всего
110 кВ	13,3	12,4	25,7	14,7	9,8	24,5
35 кВ	6,9	3	9,9	8	2	10
0,1-10 кВ	47,8	16,6	64,4	51,7	13,8	65,5
Итого:	68	32	100	74,4	25,6	100

Несмотря на то, что эти данные получены более 50 лет назад [27], можно обоснованно предложить стабильность структуры потерь. Поэтому и сейчас потери мощности (энергии) в сетях 0,1-10,0 кВ находятся на уровне 50...60 %. Сельскохозяйственные сети 0,1-10,0 кВ пропускают лишь некоторую долю электроэнергии, поэтому в относительном измерении на них приходится большой уровень потерь – 60...65 %.

Потери в трансформаторах 10/0,4 кВ при номинальной нагрузке и круглосуточном использовании, вычисленные по паспортным данным, не превышают 4...5 %. В реальных условиях суточные и годовые графики нагрузок трансформаторов резко неравномерные, а годовое число часов использования номинальной мощности не превышает 3000 часов. Все это снижает фактический КПД и увеличивает долю потерь в трансформаторе до 7...8 %.

Кроме того, нагрузка трансформатора имеет индуктивный характер с  $\cos\varphi = 0,75...0,80$ . Протекание реактивной мощности вызывает дополнительные потери. Поэтому результирующие потери могут достигать 9...10 %. Если учесть, что низковольтные сети имеют неравномерное распределение нагрузок по фазам. Асимметрия токов увеличивает потери мощности и электроэнергии в трансформаторах.

Потери в сетях 0,4 кВ, в расчетном номинальном режиме, принимают от 4 до 10 %. На стадии проектирования сетей не удастся достаточно точно учесть будущие условия эксплуатации. Эти ошибки увеличивают потери. За время использования нагрузка линии не остается постоянной. Обычно подключают дополнительные мощности в произвольных точках линии. Через некоторый период нагрузка превышает расчетную в несколько раз. Кроме этого, нагрузка линии имеет утренний и вечерний максимумы. Превышение расчетного тока, приводит к возрастанию потерь в квадратной зависимости от него.

Размер потерь также зависит от распределения нагрузки вдоль линии и от ее коэффициента мощности. Для получения этих сведений требуются дополнительные исследования, так как в свободных к доступу источниках они отсутствуют.

Важная роль экономии электроэнергии привлекает внимание энергетиков к решению этой задачи. Сейчас рассматривается много способов снижения потерь электроэнергии. Всю совокупность разделяют на организационные и технические.

Организационные мероприятия направляют действия обслуживающего персонала на разумное, эффективное применение традиционной техники и технологии. К ним относятся:

- нормирование и учет электроэнергии;
- разъяснительная работа и стимулирование за экономию электроэнергии;
- повышение квалификации исполнителей;
- оптимизация режимов работы трансформаторов, электрических линий и электропотребителей;
- сезонная перестановка ответвлений на трансформаторах;
- совершенствование способов монтажа и эксплуатации электрооборудования.

Конкретное содержание способов экономии электроэнергии для отдельных электроприемников, представлены в таблице 1.9.

Таблица 1.9 - Классификация способов экономии электроэнергии

Способ экономии	Вид электроустановки		
	Электропривод	Электронагревательная установка	Электроосветительная установка
1	2	3	4
Поддержание исправного состояния	Своевременная смазка, регулировка передаточного механизма, регулировка рабочей машины	Усиление теплоизоляции объектов, устранение утечек теплоты, очистка электрообогревателей	Очистка ламп, светильников и остекление помещения, поддержание хорошей отражательной способности светильников
Оптимизация режимов использования	Замена недогруженных (перегруженных) двигателей, переключение схемы обмоток, компенсация реактивной мощности	Рациональное размещение, выбор способа нагрева, регенерация, рекуперация теплоты, применение тепловых завес	Рациональное размещение, оптимизация освещенности, регулирование напряжения
Автоматизация установок	Ограничение холостого хода, стабилизация нагрузки	Регулирование температуры, отключение в периоды максимумов нагрузок	Программирование освещения, дистанционное управление

1	2	3	4
Внедрение новой техники	Управление электроприводом, поддержание непрерывности технологических процессов	Децентрализация схем электроснабжения, использование лучисто-конвекторных обогревателей	Рациональное размещение в помещениях новых источников света, поддержание импульсных режимов освещения

Технические способы предусматривают внедрение новой техники, другими словами, на их реализацию требуются затраты трудовых и денежных ресурсов. К ним относят:

- выравнивание графиков нагрузки за счет специальных, выравнивающих нагрузок;
- автоматическое отключение оборудования при холостом ходе;
- своевременная замена изношенного и устаревшего оборудования;
- компенсация реактивной мощности;
- симметрирование нагрузок по фазам.

Перечисленные способы, в основном, хорошо опробованы и доказали свою эффективность. Только компенсация реактивной мощности остается хорошо разработанным способом в рекомендациях, но мало применяемых в практике сельской электрификации.

Для повышения  $\cos\varphi$  электрических установок применяют ряд мер, направленных на компенсацию реактивной мощности. Увеличение  $\cos\varphi$  (уменьшение угла  $\varphi$  - сдвига фаз между током и напряжением) можно добиться следующими способами:

- 1) заменой мало загруженных двигателей двигателями меньшей мощности;
- 2) понижением напряжения на обмотках мало нагруженных двигателей;
- 3) выключением двигателей и трансформаторов, работающих на холостом ходу.

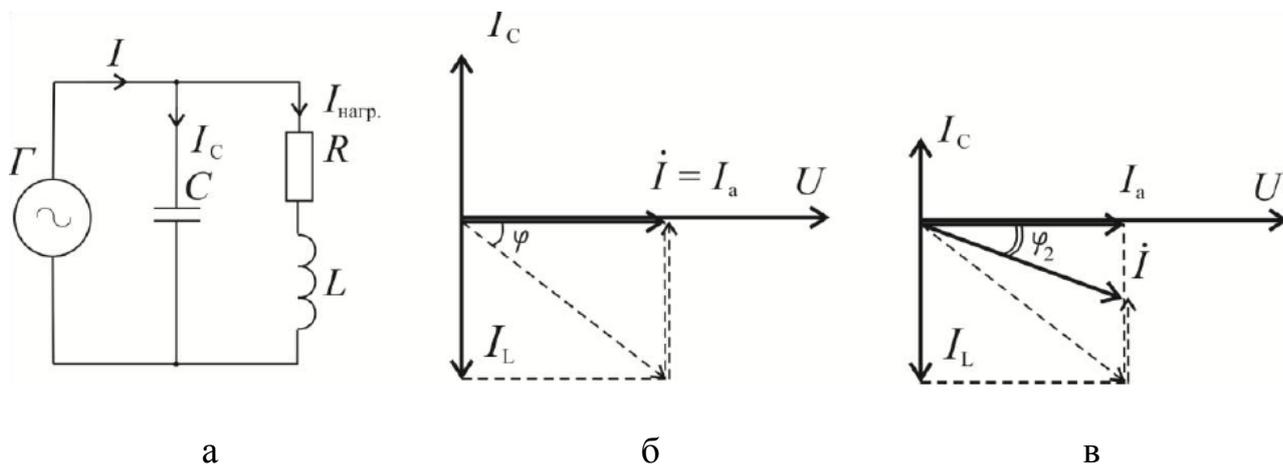


Рисунок 1.1 - Включение конденсатора для компенсации реактивной мощности (улучшение  $\cos\varphi$ ): а - схема; б - векторная диаграмма полной компенсации; в - векторная диаграмма частичной компенсации ( $\Gamma$  – генератор,  $C$  – конденсатор,  $R$  и  $L$  – сопротивление нагрузки,  $U$  – напряжение,  $I_L$ ,  $I_C$ ,  $I_{\text{нагр.}}$ ,  $I_a$ ,  $\dot{I}$  – соответственно индуктивный, емкостной, нагрузочный, активный и комплексный токи)

Для компенсации реактивной мощности применяют специальные компенсирующие устройства, являющиеся источниками реактивной энергии емкостного характера [5,10]. К техническим средствам компенсации реактивной мощности относятся следующие виды компенсирующих устройств: конденсаторные батареи, синхронные компенсаторы, вентильные статические источники (преобразователи) реактивной мощности.

**Батареи конденсаторов.** Батареи конденсаторов комплектуются из отдельных конденсаторов, соединенных последовательно и/или параллельно. Они бывают трех- или однофазного исполнения. В трехфазных сетях конденсаторы включают в звезду или треугольник. При этом последовательное соединение служит для увеличения предела рабочего напряжения, а параллельное включение расширяет предел мощности конденсаторов. При этом соединение конденсаторов в треугольник, по сравнению со звездой, увеличивает мощность в три раза. Батареи конденсаторов могут быть регулируемы и не регулируемы. Регулирование осуществляется ступенчато, отключением отдельных или групп конденсаторов. При этом конденсаторная установка такого типа должна снабжаться защитной и управляющей аппаратурой.

Основными преимуществами конденсаторов в сравнение с другими компенсаторами служат: возможность применения, на различных классах напряжения (0,22; 0,38; 10 кВ и т.д.); низкие потери активной мощности. Недостатками служат: ступенчатое регулирование реактивной мощности; чувствительность к качеству электроэнергии; зависимость генерируемой мощности от напряжения. Еще одним плюсом является низкая удельная стоимость по сравнению с другими компенсаторами.

С точки зрения эксплуатации преимуществами конденсаторов являются простота эксплуатации по сравнению с другими компенсаторами, простота монтажа, возможность использования для такой установки любого сухого помещения. Недостатки это небольшой срок службы и недостаточная электрическая прочность при аварийных режимах.

**Синхронные компенсаторы.** Из курса электрических машин известно, что в синхронной электрической машине можно увеличить вырабатываемую реактивную мощность за счет уменьшения активной. Синхронный компенсатор - это синхронный двигатель, который работает в режиме холостого хода. Он потребляет активную мощность необходимую для покрытия потерь холостого хода. По сравнению с двигателем компенсатор имеет некоторые конструктивные отличия, как облегченный вал, меньшие размеры и массу. Для того чтобы синхронный компенсатор генерировал реактивную мощность в сеть необходима его работа в режиме перевозбуждения, при чем она опережает ток на 90 градусов, являясь емкостной составляющей.

Преимуществом синхронных компенсаторов, является возможность регулирования генерируемой мощности при понижении напряжения в сети, посредством тока возбуждения, возможность плавного и автоматического регулирования отдаваемой реактивной мощности. Недостатком таких устройств является наличие вращающихся частей и большие потери активной мощности, сложность эксплуатации и монтажа.

**Статические источники реактивной мощности.** Предназначаются для плавного генерирования реактивной мощности. Плавность регулирования

осуществляется за счет тиристорного регулятора, входящего в состав устройства. Эти устройства имеют разнообразные схемы и компоновки.

В нем создается искусственное опережение напряжения током в вентильных полупроводниковых элементах, так же в состав такого устройства входят дроссель и конденсатор, за счет чего и осуществляется генерация реактивной мощности. Бывают преобразователи прямой и косвенной компенсации [2,7].

Преимуществами таких устройств является следующее: безинерционность регулирования реактивной мощности; быстродействующее регулирование; отсутствие вращающихся частей; плавность и большой диапазон регулирования. К недостаткам таких устройств компенсации относится: высокая стоимость, сложность эксплуатации, необходимость в высококвалифицированных кадрах.

Сравнивая эти источники реактивной мощности, можно сделать следующий вывод, что для сельского хозяйства, где присутствуют достаточно небольшие по сравнению с промышленностью нагрузки, наиболее оптимальным представляется использование конденсаторных батарей.

Существуют несколько видов компенсации реактивной мощности в зависимости от их места расположения. К ним относят: индивидуальная или постоянная компенсация, при которой индуктивная реактивная мощность компенсируется непосредственно в месте ее возникновения, что ведет к разгрузке подводящих проводов (для отдельных, работающих в продолжительном режиме потребителей с постоянной или относительно большой мощностью - асинхронные двигатели, трансформаторы, сварочные аппараты, разрядные лампы и т.д.); групповая компенсация, в которой аналогично индивидуальной компенсации для нескольких одновременно работающих индуктивных потребителей подключается общий постоянный конденсатор (для находящихся вблизи друг от друга электродвигателей, групп разрядных ламп). Здесь также разгружается подводящая линия, но только до распределения на отдельных потребителей; централизованная компенсация, при которой определенное число конденсаторов подключается к главному или

групповому распределительному щиту (шкафу). Такую компенсацию применяют, обычно, в небольших электрических системах с переменной нагрузкой. Управление такой конденсаторной установкой выполняет электронный регулятор - контролер, который постоянно анализирует потребление реактивной мощности из сети. Такие регуляторы включают или отключают конденсаторы, с помощью которых компенсируется мгновенная реактивная мощность общей нагрузки и, таким образом, уменьшается суммарная мощность, потребляемая от сети.

На рисунке 1.2 показаны различные схемы расположения компенсирующих устройств в электрической сети.

Индивидуальные компенсирующие устройства, работающие непосредственно с приемником, потребляющим из питающей сети реактивную мощность. При полной компенсации приемник и устройство компенсации представляют для питающей сети устройства, потребляющие только активную мощность. Однако при выключенном потребителе компенсирующие устройства также не используются, что является главным недостатком индивидуальной компенсации.

Групповая и центральная компенсация позволяет использовать устройства независимо от работы отдельных потребителей. Для реализации компенсации этого вида требуется дополнительная аппаратура - коммутационная и защитная; кроме того, компенсирующие устройства должны обеспечивать достаточный диапазон регулирования потребляемой мощности. Диапазон изменения мощности, потребляемой компенсирующими устройствами, должен быть определен на основе анализа суточной потребности, в реактивной мощности, потребляемой компенсирующими устройствами, должен быть определен на основе анализа суточной потребности в реактивной мощности, для данной группы потребителей. Как правило, для группы потребителей характерно частое изменение нагрузки, что требует применение компенсирующих устройств с автоматическим регулированием мощности, отдаваемой компенсатором.

При развитии электрической сети и тенденции к индивидуальной компенсации значение централизованной компенсации снижается. При централизованной компенсации в больших электросетях не обеспечивается компенсация во всех точках системы, особенно при размещении нагрузок на большом расстоянии от подстанций, причем, чем больше расстояние, тем больше потери в сети. Поэтому в настоящее время все чаще создают групповые компенсаторы, а для нагрузки большой мощности - индивидуальные компенсирующие устройства.

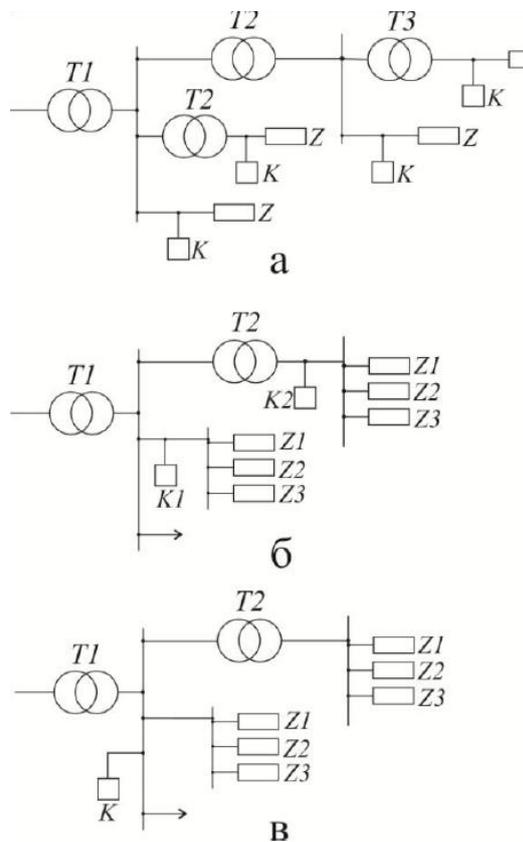


Рисунок 1.2 - Схемы подсоединения компенсирующих устройств:  
 а) индивидуальная компенсация; б) групповая компенсация; в) централизованная компенсация ( $T$  – трансформаторная подстанция;  $K$  – компенсирующее устройство,  $Z$  – потребители реактивной мощности)

Важным моментом является соответствующее расположение компенсирующих устройств, и в особенности выбор мест подсоединения схем изменения. Компенсирующие устройства целесообразно располагать так, чтобы имелась возможность стабилизации реактивной мощности в точке подключения преобразователя. В этом случае достигается ограничение

колебания напряжения в сети при изменении условий работы подключенных потребителей.

### 1.5 Постановка задач исследования

Обзор литературы свидетельствует об актуальности проблемы снижения потерь мощности и энергии в системе электроснабжения. Именно это звено общего потока энергопреобразования оказывается самым чувствительным к экономическим результатам энергосбережения. Важное значение имеет повышение *КПД* котлов, турбин, генераторов и т.п., но в системе электроснабжения используется энергия, готовая для разностороннего применения.

Общие потери в электрических сетях разделяют на технические и коммерческие. Первые из них вызваны неизбежными физическими процессами рассеивания энергии в элементах сетей. Их еще называют технологическим расходом электрической энергии на её передачу. Величина этих потерь зависит от совершенства оборудования и культуры эксплуатации. По разным литературным источникам в России эти потери составляют 9...11 %, в США и Великобритании - 8...9 %, в Германии 5...6 %. Установлено, что около 65 % потерь приходится на линии электропередач и 30 % на трансформаторы подстанций.

Коммерческие потери в образцовых сетях, находятся на уровне или чуть ниже технических потерь. Они обусловлены несовершенством системы учета, неодновременностью сбыта электроэнергии и его оплатой, а также несанкционированном потреблении (хищением) электроэнергии. Последние факторы в отдельных сетях столь развиты, что коммерческие потери достигают 30...40 %.

В электрических сетях сельскохозяйственного назначения, к которым относят подстанции 10/0,4 кВ и распределительные линии 0,4 кВ, уровень потерь несколько выше. Это обусловлено рядом причин: большая протяженность линий, неравномерная нагрузка по фазам, низкое качество

напряжения, смешанное распределение нагрузок вдоль линий, неконтролируемое присоединение потребителей, большая изношенность оборудования, суточная и годовая неравномерность графиков нагрузок и др. Особенно отличаются в худшую сторону коммерческие потери. Большая удаленность потребителей от предприятий электроснабжения затрудняет систематическое проведение организационных мероприятий по контролю и надзору за электропотреблением. Следствием такого исполнения является подключение нагрузок без счетчиков или просроченная поверка счетчиков, не своевременная оплата за электроэнергию, самовольное изменение схемы подключения, устройства дублирующих вводов.

В последние годы в сельских населенных пунктах электроэнергию используют разнообразные предприятия (акционерные общества, коллективные фермерские хозяйства, различные социальные объекты и т.д.), сельские жители, индивидуальные предприятия и другие. Всё это затрудняет организацию рациональной системы электроснабжения, а также работу по снижению потерь энергии.

Переход к рыночным отношениям предал проблеме снижения потерь огромное значение. Для энергопредприятий, потери служат прямыми убытками этих предприятий и ухудшают все показатели их деятельности. Уровень потерь влияет на материальное благополучие работников этих предприятий, а также потребителей энергии. Поэтому ведется поиск и внедрение мероприятий по снижению потерь.

Весь комплекс работ разделяют на несколько групп:

1. Технические мероприятия по реконструкции, модернизации и строительству сетей (установка компенсирующих устройств; замена проводов на провода большого сечения; замена перегруженных и недогруженных трансформаторов; установка устройств регулирования напряжения и т.д.)

2. Организационные мероприятия по совершенствованию эксплуатации установленного оборудования (оптимизация нагрузки и режимов работы по напряжению; отключение трансформаторов при малых нагрузках; выравнивание нагрузок по фазам и т.д.)

3. Мероприятия по совершенствованию учета электроэнергии (установка счетчиков высокого класса точности; вынос приборов учета за пределы жилых помещений; своевременная проверка и пломбировка приборов учета; применение административных мер к нарушителям правил пользования электроэнергией; внезапные рейды для выявления нарушителей и т.д.)

Проверенным и эффективным способом снижения потерь служит использование конденсаторов для компенсации реактивной мощности. Отечественная промышленность выпускает широкую номенклатуру конденсаторов. Обычно главным признаком классификации служит вид используемого диэлектрика. Различают следующие типы конденсаторов: воздушные; вакуумные; стеклоэмалевые; стеклокерамические; керамические; слюдяные; бумажные; металобумажные; пленочные; лакопленочные; электролитические, алюминиевые; танталовые. Среди этих типов выделяют конденсаторы для переменного тока (обычной и повышенной частоты), импульсные и постоянного тока.

Конденсаторы характеризуются рядом технических параметров: рабочее напряжение,  $V$ ; емкость,  $\mu\Phi$ ; угол потерь  $tg\delta$ ; температурный коэффициент емкости  $TKE$ ; сопротивление изоляции,  $МОм$ ; реактивной мощностью,  $кVar$ ; удельной емкостью ( $C/U$ ,  $n\Phi/cm^3$ ); удельной стоимостью,  $руб/кVar$ . Для некоторых конденсаторов основные параметры приведены в таблице 1.10.

Таблица 1.10 - Основные параметры конденсаторов

Тип конденсатора	Номинальная емкость, $n\Phi$	Напряжение, $V$	Удельная емкость, $n\Phi/cm^3$	$TKE \cdot 10^6$ (град) $^{-1}$	$tg\delta \cdot 10^{-4}$
Слюдяной	$10 \dots 10^4$	$10^2 \dots 10^4$	$10^3$	$\pm 50 \dots \pm 200$	$10 \dots 20$
Бумажный	$10^2 \dots 10^7$	$10 \dots 10^3$	$10^4$	$\pm 50 \dots \pm 200$	100
Электролитический алюминиевый	$10^5 \dots 10^6$	$4 \dots 5 \cdot 10^2$	$10^8$	$\pm 50 \dots \pm 200$	$2 \cdot 10^3$
Танталовый	$10^5 \dots 10^9$	$3 \dots 6 \cdot 10^2$	$2 \cdot 10^8$	$\pm 50 \dots \pm 200$	$10^3$

Приведенные сведения свидетельствуют о том, что выпускаемые бумажные и слюдяные конденсаторы могут покрыть требования к компенсирующим устройствам в сельскохозяйственных сетях. Однако они

применяются в редких случаях. Можно предположить, что это объясняется высокой стоимостью (до 800 руб/кВАр) и большими габаритами (до  $10^4$  нФ/см<sup>3</sup>) конденсаторов. Вместе с тем по габаритно-стоимостным показателям большие преимущества имеют электролитические и танталовые конденсаторы. Но они предназначены для фильтров в цепях выпрямленного или постоянного тока. Хотя в некоторых технических инструкциях имеются сведения о применении их в цепях переменного тока. Поэтому возникла важная задача обоснования возможности применения электролитических конденсаторов для компенсации реактивной мощности.

Для решения данной проблемной ситуации сформулируем следующие задачи исследования:

- выполнить анализ характеристик электрических сетей напряжением до 1000 В сельскохозяйственного назначения и обосновать объект исследования;
- обосновать выбор конденсаторов в условиях неопределенности и разработать схемы включения устройства компенсации реактивной мощности полярными конденсаторами (УКПК);
- исследовать работоспособность полярных конденсаторов в цепях переменного тока в однофазном и трехфазном режимах, определить уровень повышения коэффициента мощности;
- оценить экономическую эффективность внедрения УКПК в качестве индивидуальной компенсации реактивной мощности.

## **2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛЯРНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ В СЕТЯХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

### **2.1 Методика исследования**

Применение электрической энергии в производстве, быту или в других случаях является завершающим этапом в сложном энергетическом процессе, который включает генерирование, распределение и использование энергии. На каждом этапе выделяют входные и выходные энергетические параметры. Для генерирующего звена входным параметром служат потенциальные возможности топлива, а выходным - выработанная электроэнергия. В электрической сети на входе - подведенная электроэнергия, а на выходе - энергия поданная потребителю. При использовании входным параметром служит энергия, принятая из электрической сети, а выходным - энергия, подведенная к рабочему органу. В общем случае разница между выходными и входными показателями есть потери энергии. Их оценивают в абсолютных и в относительных величинах.

Величина потерь зависит от множества факторов. Прежде всего, она зависит от разработанности (совершенства) процесса преобразования энергии. Это определяется уровнем развития техники. Здесь влиять на уровень потерь можно за счет развития науки и энергомашиностроения, а также совершенствования метода проектирования элементов и всей системы энергопреобразования в целом. Величина этих потерь зависит от уровня развития отрасли и регулируется в плановом порядке по государственным программам.

Потери электроэнергии зависят еще от множества эксплуатационных факторов. Это выбор и поддержание оптимальных режимов работы, поддержания высоких показателей надежности, своевременная замена изношенного оборудования и т.д. На этом уровне величина потерь может

изменяться планомерными действиями эксплуатационного персонала соответствующих подразделений системы энергоснабжения.

Развитие электроэнергетики и эксплуатационных мер направлено на снижение потерь. Уже сейчас электрооборудование имеет высокий коэффициент полезного действия: трансформаторы  $\eta_m = 0,90 \dots 0,98$ , электродвигатели  $\eta_d = 0,60 \dots 0,90$  и т.д. Это намного больше *КПД* тепловых двигателей и установок. Однако эти преимущества еще не решают проблему снижения общих потерь в электрических сетях и электроприемниках. Эта проблема особенно актуальна для сельской электрификации, что обусловлено двумя причинами. Во-первых, заметным увеличением потребления электроэнергии в связи с нарастанием темпов развития сельскохозяйственного производства. Во-вторых, рассредоточенностью сельских потребителей на большой территории и их удаленностью от генерирующих центров. Концентрация производства электроэнергии на мощных электростанциях и централизация электроснабжения от единой энергетической системы приводит к росту магистральных и распределительных сетей и потерь электроэнергии в них.

Обобщенная схема электроснабжения сельских районов представлена на рисунке 2.1.

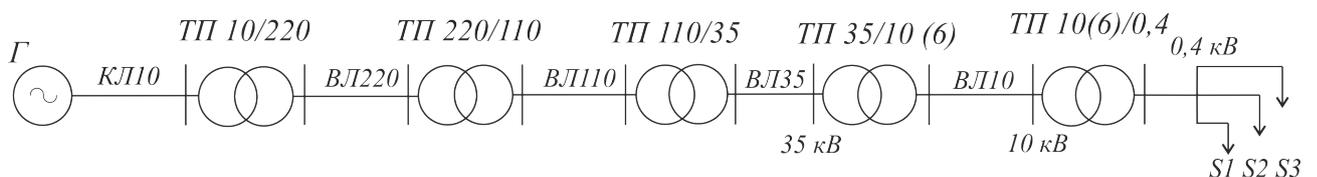


Рисунок 2.1 - Обобщенная схема электроснабжения

На пути от генератора  $S_G$  электроэнергия претерпевает  $n = 5$  ступеней трансформации и проходит по  $m = 5$  линиям электропередач разного класса напряжения. В каждом звене электроэнергия теряется. Предположим, что усредненный *КПД* трансформатора каждого звена имеет высокий уровень  $\eta_m = 0,92$ , а потери в каждой линии составляют всего 5 %, т.е.  $\eta_n = 0,95$ . Общий *КПД* системы, отнесенной к потребителям 0,4 кВ составит

$$\eta = \eta_r^n \eta_n^m = 0,92^5 0,95^5 = 0,6 * 0,77 = 0,46. \quad (2.1)$$

Другими словами до потребителя доходит лишь половина энергии вырабатываемой на электростанции. Конечно, это условный пример, но детальный учет всех особенностей трансформаторов, линий электропередач, графиков нагрузок, реактивной мощности и т.п. приводит к выводу о том, что для сельских потребителей проблема снижения потерь энергии имеет большое народнохозяйственное значение.

В сложившейся практике проблема потерь решается применительно к каждому звену системы электроснабжения и электропотребления. В сельских условиях ставится задача сокращения потерь в трансформаторах 10/0,4 кВ и линиях 0,4 кВ. За счет использования специальных способов. При этом должны использоваться эксплуатационные меры, которые позволяют поддерживать оптимальные энергетические характеристики звеньев электроснабжения и потребителей. Это выбор оптимальной загрузки, своевременное техническое обслуживание и текущий ремонт, симметрирование нагрузок по фазам и т.д. Наилучший эффект может быть достигнут при рациональном сочетании всех возможных способов.

Сельские потребители, как видно, из рисунка 2.1 являются последним звеном в системе электроснабжения. Каждый киловатт мощности проходит по всей цепи и создает потери во всех трансформаторах и линиях электропередач. Поэтому снижение потребляемой мощности или её потерь в последнем звене приводит к заметному сокращению энергоресурсов в системе электроснабжения. Таким образом, снижение потерь электроэнергии в сельских трансформаторах и воздушных линиях служит эффективной мерой повышения эффективности всей системы электроснабжения.

Исследование рассматриваемой темы, с методических позиций, заключается в раскрытии закономерностей применения конденсаторов в сельских электрических сетях. Для этого необходимо выявить требования (ориентировочно) к средствам компенсации реактивной мощности и определить группу перспективных конденсаторов; обосновать объект исследования; выбрать схему включения полярных конденсаторов; определить

место включения конденсаторов; разработать теорию рабочего процесса и переходные режимы работы; выполнить экспериментальные и производственные испытания; оценить экономические результаты применения полярных конденсаторов.

## 2.2 Обоснование объекта исследования

Выбор рациональных способов снижения потерь мощности и энергии в низковольтных сельскохозяйственных сетях зависит от совокупности факторов, характеризующих электроснабжение сельскохозяйственных предприятий и электропотребление в них. Эти предприятия весьма разнообразны по специализации, размерам, уровню электрификации и т.д. В работе главное внимание уделено предприятиям зернового направления, птицеводческим и животноводческим объектам. В производственном секторе используется переработка зерна, приготовление кормов, обслуживание животных и птицы, водоснабжение, выборочное орошение и т.п. В бытовом секторе основными электроприемниками являются осветительные и бытовые приборы.

Важную роль играют географические характеристики населенных пунктов. В рассматриваемой зоне селения обычно размещаются вдоль речных долин, прудов, озер, железнодорожных линий. Они имеют разнообразные размеры. Например, число домов может быть от 10 до 1000.

Все селения и сельскохозяйственные предприятия имеют централизованное электроснабжение от высоковольтных линий 10 кВ, которые заканчиваются распределительными подстанциями 10/0,4 кВ. В населенном пункте число таких подстанций изменяется от 1 до 10. От каждой из них отходят 2...5 линий напряжением 0,4 кВ, к которым подключены производственные и бытовые потребители. В литературных источниках можно найти сведения о мощности трансформаторов, сечении проводов и т.д. Все это лишь свидетельствует о том, что исходная информация имеет неопределенный характер и не позволяет исследовать проблему снижения потерь.

Для конкретизации ожидаемых результатов объектом исследования принимаем подстанцию 10/0,4 кВ с несколькими отходящими воздушными линиями (ВЛ) 0,4 кВ. Сведения о мощности трансформатора, характеристиках ВЛ и их нагрузках получим по статистическим данным сельской электрификации.

Некоторые сведения об объекте исследования, полученные по литературным данным [11,12,63], приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1 - Характеристики электропотребления сельских населенных пунктов

	Тип ВЛ 0.4 по нагрузке	Доля от общего числа (%)	Число отходящих ВЛ (шт.)	Средняя длина (м)	Структура нагрузки (о.е.)	Мощность нагрузки (кВт)	Мощность трансформатора (кВА)
1	Бытовая нагрузка	23	3	900	0	25...63	100
2	Производственная нагрузка	6	2-3	300	1,0	40...63	160
3	Смешанная нагрузка	71	3-4	600	0,6...0,9	63...180	250

Отсюда видно, что в расчетной схеме следует принять 3 отходящие линии. Первая линия с осветительной нагрузкой 63 кВт, длиной 900 м и мощностью трансформатора 100 кВА. Вторая линия с производственной нагрузкой мощностью 63 кВт, длиной 300 м и трансформатором 160 кВА. Третья линия со смешанной нагрузкой мощностью 180 кВт, длиной 600 м и трансформатором 250 кВА.

Для дальнейшего изучения энергопотребления в сельских условиях введены следующие характеристики:

$$X = \frac{P_c}{P},$$

где  $X$  - коэффициент структуры нагрузок, равный отношению мощности силовых  $P_c$  (индуктивных) потребителей с суммарной мощностью  $P$ ;

$$K_{лн} = \frac{P_{\kappa}}{P_n},$$

где  $K_{лн}$  - коэффициент линейной плотности нагрузки линии, равной отношению удельной нагрузки (кВт/м) конца линии  $P_{\kappa}$  к удельной нагрузке её начала  $P_n$ .

Коэффициент структуры легко определяется по статистическим данным.

Непосредственное вычисление  $K_{лн}$  не может в должной мере выявить характер изменения удельной нагрузки вдоль линии, так как при этом не учитываются потребители на её промежуточных участках. Для устранения этого недостатка удельная нагрузка на промежуточном участке и в конце линии будет иметь вид:

$$p_l = p_n + \nu l, \quad (2.2)$$

$$P_H = p_n + \nu L, \quad (2.3)$$

где  $p_n$  – удельная нагрузка в начале линии,  $\kappa Bm/m$ ,  $l$ ,  $L$  - текущее значение и полная длина линии,  $m$ .

Подставляя сюда  $K_{лн}$  и решая уравнения (2.1) и (2.2), получим общее уравнение характера распределения нагрузки по длине линии

$$p_l = p_n \left[ 1 + (K_{лн} + 1) \frac{l}{2} \right], \quad (2.4)$$

где  $p_l$  - текущее значение удельной нагрузки,  $\kappa Bm$ .

После интегрирования от 0 до  $L$  находим суммарную нагрузки линии

$$P = P_n L \left( \frac{K_{лн} + 1}{2} \right). \quad (2.5)$$

Отсюда находим уравнение расчета коэффициента линейной плотности нагрузки

$$K_{лн} = \frac{2P - P_n L}{P_n L}. \quad (2.6)$$

Все величины находятся по результатам обследования электрических сетей. Эти данные для рассмотренных в работе сельскохозяйственных электрических сетей 0,4  $\kappa B$  приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2 - Статистические характеристики сельских сетей

	Характеристики	Осветительная нагрузка	Производственная нагрузка	Смешанная нагрузка
1	Протяженность(м)	900,0	250,0	500,0
2	Нагрузка головного участка ( $\kappa Bm$ )	8,0-9,0	28,0-32,0	12,0-24,0
3	Структура нагрузки (о.е.)	0	1,0	0,7
4	Коэффициент линейной плотности (о.е.)	1,3	0	0,7

Полученные данные свидетельствуют, что характеристики низковольтных сетей за последнее время изменились от ранее приведенных. Но принципиальных отличий не наблюдается. В качестве объекта принимаем 3 типа линии:

- 1 - линии с распределенной осветительной (бытовой) нагрузкой;
- 2- линии с индуктивной (производственной) нагрузкой;
- 3- линии со смешанной нагрузкой.

### **2.3 Требования к средствам компенсации реактивной мощности**

Компенсация реактивной мощности это один из способов снижения потерь электрической мощности и энергии в энергетических системах. Для этого используют компенсаторы, синхронные двигатели и конденсаторы, которые включают в узлах с индуктивной (отстающей) нагрузкой. Для этой нагрузки они вырабатывают опережающую (емкостную) мощность. В итоге компенсируется реактивная мощность сети, что снижает в ней полный ток и потери энергии в трансформаторах и электрических линиях.

Компенсирующие устройства (КУ) давно применяют в энергосистемах и промышленных предприятиях. В сельской электрификации КУ используют редко. Одной из причин служит отсутствие научных разработок и практических рекомендаций в этой области. Важно выявить требования к КУ.

Для решения этой задачи объектом исследования принимаем звено сельского электроснабжения, состоящее из трансформаторной подстанции 10/0,4 кВ и отходящие воздушные линии (ВЛ-0,4 кВ). Мощность трансформатора от 63 до 1000 кВА; число отходящих линий от 1 до 4; длина ВЛ 200...1000 м; характер нагрузок от активной до активно-индуктивной с  $\cos \varphi = 0,7$ ; нагрузка может быть сосредоточенной или равномерно-распределенной вдоль линии.

КУ характеризуются рядом технических и экономических параметров. Применительно к конденсаторам техническими характеристиками служат: напряжение, емкость, ток и массогабаритные показатели. Экономические

характеристики оцениваются стоимостью, затратами на монтаж и эксплуатацию и, самое главное, экономической эффективностью применения конденсаторов. Дело в том, что использование конденсаторов должно быть оправдано экономически. Стоимость сбереженной энергии за расчетный период должна быть больше затрат на приобретение и установку КУ.

Напряжение конденсаторов, применяемых в низковольтной сети должно быть больше фазного напряжения при соединении «звездой» или линейного при соединении «треугольником». Запас по напряжению принимают не менее 10 %.

Емкость конденсаторов  $C$  определяют по известному выражению

$$C = \frac{P}{\omega U^2} (tg \varphi_1 - tg \varphi_2), \quad (2.7)$$

где  $P$  - активная мощность нагрузки,  $kBm$ ;  $U$  - напряжение сети,  $B$ ;  $\omega = 2\pi f$  - круговая частота,  $f = 50$  Гц,  $tg \varphi_1$ ,  $tg \varphi_2$  - значения, определяемые через  $cos \varphi_1$  и  $cos \varphi_2$  - до и после компенсации.

Ток, потребляемый конденсатором  $I_C$

$$I_C = \frac{U}{X_C} = \omega C U. \quad (2.8)$$

Реактивная мощность конденсатора  $Q_C$

$$Q_C = UI = \omega C U^2. \quad (2.9)$$

Расчетные значения (2.7), (2.8), (2.9), применительно к отдельному конденсатору, должны учитывать их соединение: последовательное и параллельное, а также схему включения: «звезда», «треугольник». По полученным результатам в справочных данных подбирают такой конденсатор, у которого номинальные параметры не меньше расчетных.

Экономическое обоснование требований к КУ заключается в сравнении полных затрат в сети без конденсаторов  $Z_1$  и затрат после включения конденсаторов  $Z_2$ :

$$Z_1 = EK_1 + Z_{\text{э1}} + ЦW_1, \quad (2.10)$$

$$Z_2 = E(K_1 + K_k) + Z_{\text{э2}} + Ц(W_1 - W_2), \quad (2.11)$$

где  $K_1$  – балансовая стоимость сети, руб.;  $K_k$  – балансовая стоимость конденсаторов, руб.;  $Z_{э1}, Z_{э2}$  – затраты на эксплуатацию в сравниваемых вариантах, руб.;  $W_1, W_2$  – потребляемая электроэнергия в этих вариантах, кВт\*ч;  $C$  – тариф или замыкающие удельные затраты на электроэнергию, руб./кВт\*ч;  $E$  – суммарный коэффициент нормативной окупаемости и реновационных отчислений, о.е.

Предположим, что работа по экономии потерь электроэнергии не изменяет балансовую стоимость сети и эксплуатационные затраты, а также тариф на электроэнергию. Применение конденсаторов будет оправдано если  $Z_2 < Z_1$ , т.е. суммарные затраты снизятся.

Подставляя в это условие уравнение (2.11) получим:

$$\begin{aligned} EK_k &< C'\Delta W; \\ K_k &< \frac{C'\Delta W}{E}, \end{aligned} \quad (2.12)$$

где  $\Delta W = W_1 - W_2$  – снижение потерь энергии, кВт\*ч;  $C' = Cb_k$  – удельные затраты с учетом потерь в энергосистеме, руб./кВт\*ч.

Для объектов сельской электрификации можно принять  $E = 0,2$ ,  $b_k = 1,2$ ,  $C = 3 \dots 4$  руб./кВт\*ч. Подставим эти данные в (2.10) и получим обобщенное условие экономической целесообразности установки конденсаторов  $\Delta K$  – дополнительные капиталовложения, руб.

$$\Delta K < (18 \dots 24)\Delta W. \quad (2.13)$$

Это означает, что допустимые затраты на установку конденсаторов не должны превышать стоимости сэкономленной электроэнергии в 18...24 раза (в среднем 20 раз).

Условие (2.13) предполагает, что энергетический эффект от дополнительных капиталовложений будет наблюдаться в течение периода не менее нормативного срока окупаемости вложений (6,6 года). Другими словами, на экономию 1000 кВт\*ч/год вложения на конденсаторную установку не должны превышать 20000 руб.

## 2.4 Теоретическое обоснование рационального типа конденсатора

Первый конденсатор был изобретен 250 лет назад в университете немецкого города Лейдена. Он получил название «Лейденская банка». К настоящему времени конденсаторы прошли сложный путь развития, появилось множество типов, форм и конструкций. Применение новых материалов и технологий позволили существенно улучшить качество конденсаторов. Полный заряд, который мог накапливаться в «Лейденской банке» объемом 1 литр, теперь можно накопить в конденсаторе размером не больше булавочной головки. Резко расширились характеристики по напряжению, емкости, конструкции и т.п.

Для условий электроснабжения сельского хозяйства наибольший интерес представляют следующие типы конденсаторов.

Новое поколение косинусных конденсаторов низковольтных тип КПС. Предназначенные для систем компенсации реактивной мощности (КРМ), в том числе для индивидуальной компенсации (подключение параллельно двигателя). Они изготавливаются по МКР - технологии и вакуумной обработки пленочного диэлектрика. Это позволяет увеличить гарантированный срок эксплуатации до 100000 часов.

Длительная сухая вакуумная обработка удаляет влагу из активных элементов. Далее конденсатор наполняется пожаробезопасной смолой. Такой процесс помогает избежать окисления и частичные разряды, а также поддерживать стабильность емкости.

Конденсаторы обладают свойством самовосстановления главных характеристик при перегрузках. Встроенные разрядники, предохранители избыточного давления предотвращают разрыв корпуса при перенапряжениях и других аварийных ситуациях. Допустимое превышение напряжения – 110%, тока – 130%. Номинальные параметры приведены в таблице 2.2 при напряжении 400 В.

Таблица 2.2 - Характеристики конденсаторов КПС

Мощность кВАр	Ток, А	Емкость, мкФ	Габариты диаметр/высота (мм)	Масса, кг.
2,5	3,6	3x16,5	75x210	1,0
5,0	7,2	3x33	75x210	1,0
7,5	10,8	3x50	75x247	1,2
10	14,4	3x66	85x247	1,8
12,5	18,0	3x83	85x285	2,0
15,0	21,7	3x100	85x360	2,3
20,0	28,9	3x133	100 x295	2,3
25,0	36,0	3x166	120 x300	2,8
30,0	46,2	3x199	136x300	3,2
40,0	57,7	3x265	136x300	5,0
50,0	72,1	3x331	136x400	6,2

Конденсаторы комплектуются в однофазные и трехфазные устройства компенсации реактивной мощности с ручным управлением (УКРМ) или с автоматическим (АУКРМ). Стоимость УКРМ составляет 700-1100 руб./кВАр, затраты на монтаж 100-150 руб./кВАр. В целом же конденсаторы КПС имеют ряд преимуществ:

- малые габаритные размеры и массу;
- температурный диапазон  $-25 \dots + 55 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- малые потери в диэлектрике  $< 0,5 \text{ Вт/кВАр}$ ;
- унифицированные разъемы для кабеля;
- не требуют обслуживания и имеют безопасный наполнитель;
- рассчитаны на эксплуатацию в сети с гармониками;
- защита от поражения электрическим током ( $IP 20$ ).

#### 2.4.1 Электролитические конденсаторы полярные

В электролитическом конденсаторе диэлектриком служит тонкая оксидная пленка, образованная в результате электрохимической реакции на алюминиевом аноде, служащим первой обкладкой конденсатора. Второй обкладкой служит электролит, соприкасающийся с оксидной пленкой [1,34]

По своей природе они являются полярными, и могут работать в цепях постоянного или пульсирующего тока. В случае, если полярность будет

нарушена, внутри него нарушится слой окиси и через конденсатор потечет большой ток, конденсатор начнет греться, что приведет к его отказу.

Одной из особенностей электролитического конденсатора является зависимость его службы от температуры. Полагают, что на каждые 10 градусов превышения температуры срок службы сокращается в 2 раза. Расчетная температура 105 °С.

Гарантируемый срок службы электролитического конденсатора означает, что его номинальная емкость в течение этого срока не превысит свое значение на  $\pm 20$  %. Превышение срока службы означает, что он будет работать, но значение емкости выйдет за установленные пределы.

Для повышения надежности и срока службы рекомендуется использовать электролитические конденсаторы с расширенными температурными диапазонами.

Краткая характеристика некоторых электролитических конденсаторов представлена в таблице 2.3.

Таблица 2.3 - Характеристики полярных конденсаторов YAGEO

Серия	Рабочее напряжение, В	Диапазон температур, С	Диапазон емкостей, мкФ	Срок службы, ч	Примечание
SB	6,3 – 400	-40 ...+105	1 - 330	2000	Общее назначение
SX	6,3 – 100	-40 ...+105	22 - 15000	2000-5000	В импульсных источниках питания
SG	160 – 400	-40 ...+105	2 - 300	5000	Использование в электронных баластах

Таблица 2.4 - Характеристики полярных конденсаторов KENDEIL

Серия	Рабочее напряжение, В	Диапазон температур, С	Диапазон емкостей, мкФ	Срок службы, ч	Примечание
K01	16 - 500	-40...+85	220-1500000	12000	Стандартные
K02	16 - 450	-40...+105	100-47000	500	Высокотемпературные
K04	350 - 550	-40...+85	1500-15000	20000	Долговечные

Важным преимуществом электролитических конденсаторов служат их малые габариты и масса. О применении в системах компенсации реактивной мощности не сообщается.

Вместе с тем, в литературе [43,47,52,89,98] сообщается о возможности включения полярных конденсаторов в цепи переменного напряжения, и приводятся примеры их применения в электронных узлах. Один из вариантов включения электролитов в цепь переменного тока показан на рисунке 2.2.

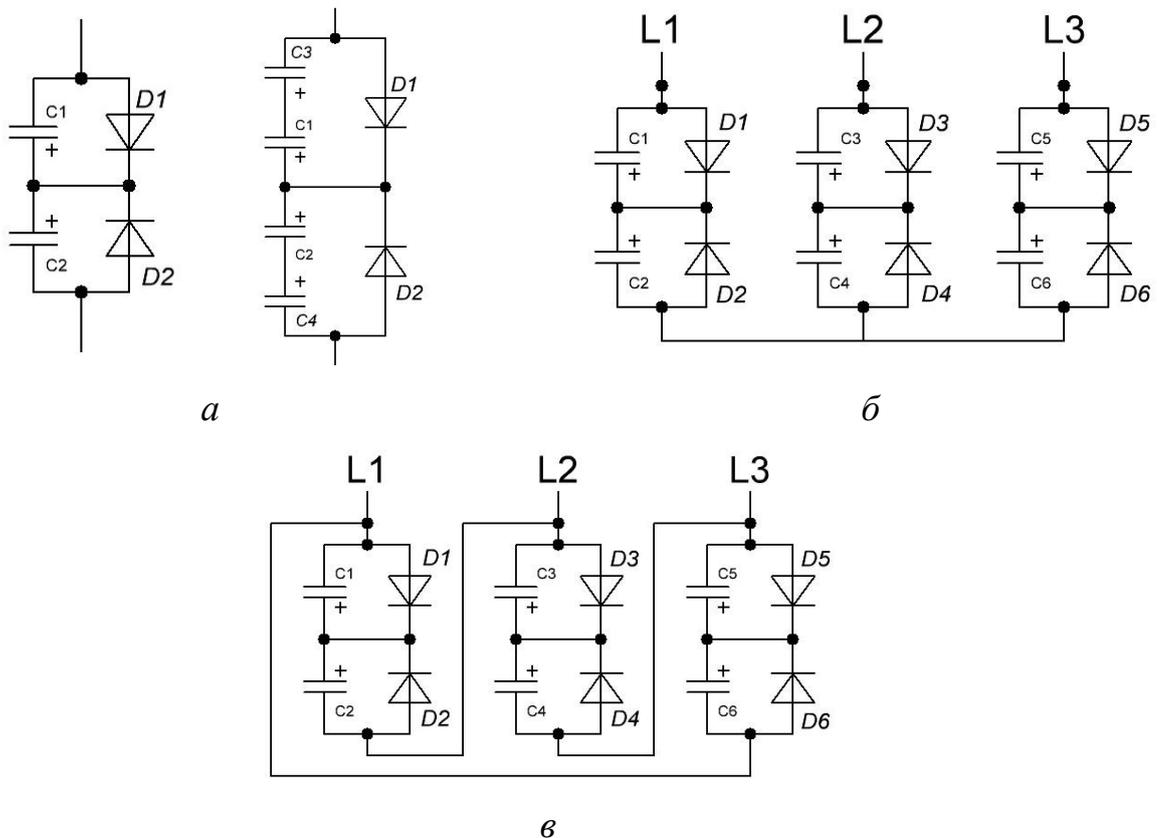


Рисунок 2.2 - Схемы включения полярных конденсаторов в цепи переменного тока: а) однофазная цепь одного и последовательно соединенных конденсаторов; б) трехфазная цепь по схеме «звезда»; в) трехфазная цепь по схеме «треугольник»

В данных схемах каждый конденсатор должен выбираться на рабочее напряжение, не меньше амплитудного между началом и концом фазы или началами фаз [47].

## 2.4.2 Электролитические конденсаторы неполярные

Оксидные пленки позволяют создавать электролитические конденсаторы не только для работы в сетях постоянного (импульсного) тока, но и неполярные, которые могут включаться в сеть переменного тока. По паспортным данным они предназначены для использования в схемах с реверсивной полярностью постоянного напряжения.

Таблица 2.5 - Характеристики неполярных конденсаторов

Серия	Рабочее напряжение, В	Диапазон температур, С	Диапазон емкостей, мкФ	Срок службы, ч	Примечание
SN YAGEO	6,3.....100	-40...+105	0,5.....2200	1000	
K13 KENDEIL	125.....32	-25...+75	25.....800	5000	Пусковые для двигателей

Три типа указанных конденсаторов имеют самое разнообразное применение в энергетике, электронике, авиации и т.п. Их характеристики наиболее полно предназначены для своих областей применения. Например, косинусные конденсаторы ориентированы для компенсации реактивной мощности на промышленных предприятиях. Сельскохозяйственные электрические сети имеют специфические характеристики, и рациональное применение перечисленных конденсаторов требуют дополнительного обоснования. Для электролитических конденсаторов, кроме того, требуется проверка успешного функционирования при переменном напряжении. Еще одна особенность применения конденсаторов в сельских электрических сетях состоит в том, что эти сети не имеют устойчивых параметров  $\cos\varphi$ , числа часов использования установленной мощности, степени загрузки потребителей и т.д. Другими словами, задача выбора конденсаторов для сельских сетей является задачей в условиях неопределенности. Поэтому на первом этапе необходимо найти общее теоретическое обоснование методики выбора, а затем осуществить рациональный выбор из всего известного парка конденсаторов.

Сущность компенсации, как отмечалось раньше, состоит в уменьшении индуктивной составляющей тока. Если общий ток отстает от напряжения на угол  $\varphi_1$ , то подключение конденсатора уменьшает угол до  $\varphi_2$ . В частном случае  $\varphi_1 - \varphi_2 = 0$  и наступает резонанс токов. Нормативные документы регламентируют увеличение угла до  $\cos\varphi_2 = 0,95$ . Чтобы выполнить это условие к нагрузке мощностью  $P$  с  $\cos\varphi_1 = Kl$  необходимо подключить конденсатор емкостью

$$C = \frac{P(\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2)}{\omega U^2}, \quad (2.14)$$

где  $\omega = 2\pi f$ ,  $f = 50$  Гц,  $U$  – напряжение сети,  $\operatorname{tg}\varphi_1$ ,  $\operatorname{tg}\varphi_2$  – значения, определяемые через начальный  $\cos\varphi$ , и желаемый  $\cos\varphi_2 = 0,95$ .

Конденсатор потребляет ток  $I_c$

$$I_c = \omega CU, \quad (2.15)$$

который направлен встречно индуктивному току  $I_L$  и уменьшает его (компенсирует).

Это приводит к снижению полного тока потребителя и снижает потери мощности сети, по которой он протекает.

В общем случае потери в однофазной сети  $\Delta P$  имеют вид

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q_L^2 - Q_C^2}{U^2} \frac{\rho l}{F} (P^2 + Q_L^2 - Q_C^2) M, \quad (2.16)$$

где  $P$ ,  $Q_L$ ,  $Q_C$  – активная, индуктивная и емкостная мощность потребителя, кВт и кВар;  $U$  – напряжение сети,  $B$ ,  $\rho$ ,  $l$ ,  $F$  – удельное сопротивление,  $l$  – длина,  $m$ ;  $F$  – сечение провода линии,  $mm^2$ ;  $M = \rho l / U^2 F$  – комплексный параметр линии.

В идеализированном случае наименьшие потери будут при  $Q_L = Q_C$  и будут составлять

$$\Delta P_{min} = P^2 M. \quad (2.17)$$

Таким образом, условие минимальных потерь мощности есть равенство реактивной мощности конденсатора реактивной мощности потребителя.

Реактивная мощность конденсаторов для однофазной сети 220 В, как известно,

$$Q_c = \omega CU^2. \quad (2.18)$$

В рассматриваемом случае наименьшие потери определяются выражением (2.17), а величина скомпенсированных (сбереженных) потерь мощности  $\delta P$  и энергии  $\delta W$

$$\delta P = \frac{Q_c^2}{U^2 \rho \frac{l}{S}} = \frac{Q_c^2}{U^2 M}. \quad (2.19)$$

$$\delta W = \delta P \cdot \tau. \quad (2.20)$$

При детерминированных условиях выбор компенсирующих конденсаторов производится за два этапа: 1 – для заданных значений  $\cos\varphi_1$  и  $\cos\varphi_2$  по уравнению (2.14) определяется емкость конденсатора; 2 – по уравнению (2.18) определяется реактивная мощность конденсатора, а далее разрабатывается схема управления и конструкции установки.

Таким путем можно выбрать требуемый по техническим характеристикам один из рассмотренных ранее типов конденсаторов. Однако такой выбор не гарантирует оптимальное решение.

Несмотря на то, что ранее был определен объект изучения для сельскохозяйственных электрических сетей, характеристики объекта имеют большой разброс, т.е. являются неопределенными. Мы имеем типичную задачу отыскания оптимальных решений в условиях неопределенности.

Задача состоит в следующем. Имеется 3 варианта конденсаторов  $C_i$  и множество условий их применения:  $l$  – длина линий,  $\tau_c$  – годовое число часов использования нагрузок;  $S$  – сечение провода;  $\cos\varphi_1$  – начальный коэффициент мощности и т.п. Требуется выбрать рациональный тип конденсатора.

Условимся, что каждым вариантом  $C_i$  однозначно определяется некоторый результат. В детерминированных задачах это обычно безусловный критерий оптимальности. В условиях неопределенности это некоторая оценочная функция  $e_{ij}$ , по которой далее вводится условный критерий оптимальности. Другими словами, задача состоит в следующем. Известные типы конденсаторов  $C_i$  создают поле исходных данных, а варианты состояний сети  $E_i$  – поле возможных условий включения конденсаторов. Требуется выбрать тип конденсатора, являющийся наиболее выгодным среди

сравниваемых. Каждому варианту  $C_i$  в каждом варианте  $E_i$  будут соответствовать различные результаты решения, которые являются оценкой  $e_{ij}$ , соответствующий варианту действия  $C_i$  в условиях  $E_i$ . При этом все семейство решений описывается матрицей, содержащей  $n$  вариантов решений (строка) и  $m$  состояний исходных даны (строк).

Таблица 2.6 - Матрица решений

$E \backslash C$	$E_1$	$E_2$	$E_j$	$E_m$
$C_1$	$e_{11}$	$e_{12}$	$e_{1j}$	$e_{1m}$
$C_2$	$e_{21}$	$e_{22}$	$e_{2j}$	$e_{2m}$
$C_i$	$e_{i1}$	$e_{i2}$	$e_{ij}$	$e_{im}$
$C_n$	$e_{n1}$	$e_{n2}$	$e_{nj}$	$e_{nm}$

Совокупность значений  $e_{ij}$  дает достаточно полную картину поле поиска искомого результата, но не отражает достоинства и недостатки каждого отдельного решения. Для однозначного выбора лучшего варианта вводится оценочная функция, которая дает оценку всей  $i$ -й строке. Затем принимается условный критерий предпочтения (оптимальности) решения и по нему находится окончательный результат.

Известны различные критерии предпочтения: Вальда, Байеса-Лапласа, Сэвиджа и др. чаще используемый критерий Вальда отдает предпочтение оценочной функции, соответствующей позиции крайней осторожности (пессимизма) и выбирают вариант с максимальной полезностью при наихудших условиях

$$\max_i = \max(\min e_{ij}). \quad (2.21)$$

Правило выбора решения в соответствии с критерием Вальда состоит в следующем: матрица решений  $\|e_{ij}\|$  дополняется еще одним столбцом из наихудших результатов  $e_{ij}$  каждой строки и выбирается вариант  $C_i$  в строке которого стоит наилучшее значение из выбранных наихудших вариантов. Выбранный таким образом вариант исключает риск. Это означает, что принятое решение не может быть хуже, чем найдено в поле матрицы  $\|e_{ij}\|$

Поэтому критерий Вальда считается фундаментальным и в технических задачах он применяется чаще всего.

В качестве оценочной функции, в нашей задаче целесообразно принять экономическую оценку результатов компенсации потерь с помощью конденсаторов. Среди возможных вариантов наглядными являются затраты на  $\text{кВт}\cdot\text{ч}$  сбереженной энергии в течение года. Их можно оценить по уравнению (2.20).

Предположим, что заданы удельная стоимость 1  $\text{кВар}$  конденсатора и затраты на монтажные работы  $Z_{kij}$ . Известны характеристики сети, где будут включены конденсаторы и можно определить диапазон сбереженной энергии  $\delta W_{ij}$ . Тогда оценочная функция может быть представлена в виде

$$e_{ij} = Z_{kij} / \delta W_{ij}. \quad (2.22)$$

В качестве лучшего варианта принимаем наименьшее значение удельных затрат на компенсацию реактивной мощности. Рассмотрим подробнее составляющие оценочной функции (2.22). Затраты на конденсаторы

$$Z_{kij} = z_i K_{mi} K_{ci} Q_i, \quad (2.23)$$

где  $z_i$  - удельная стоимость конденсатора ( $\text{руб.}/\text{кВар}$ );  $K_{mi} = 1.2 - 1.3$  - увеличение затрат на автоматику и монтаж;  $K_{ci} = 23$  - коэффициент схемы, учитывающий необходимость увеличения емкости и номинального напряжения в электролитических полярных конденсаторах;  $Q_i$  - реактивная мощность конденсаторов.

Размер сэкономленных потерь энергии

$$\Delta W_{ij} = \frac{Q_i^2 R_i T}{U^2}, \quad (2.24)$$

где  $R_i$  - сопротивление проводов линии,  $\text{Ом}$ ;  $T$  - годовое число часов использования конденсаторов,  $\text{ч}/\text{год}$ ;  $U$  - напряжение сети,  $\text{В}$ .

С учетом (2.22), (2.24) оценочная функция приобретает вид

$$e_{ij} = \frac{z_i K_{mi} K_{cj} \tau_j^2}{Q_i R_i \tau_i}. \quad (2.25)$$

После подстановки конкретных решений получаем искомую матрицу. Для применения критерия Вальда составим дополнительный столбец, куда

вынесем наименьшие значения удельных затрат на компенсацию по каждой строке.

Таблица 2.8 - Матрица результатов

$C$	$E$			Дополнительный столбец
	$E_1$	$E_2$	$E_3$	
$C_1$	6,0	3,0	2,0	2,0
$C_2$	5,1	3,6	1,8	1,8
$C_3$	4,6	2,3	2,5	2,3

По критерию Вальда, который гарантирует наименьшие затраты при наихудших условиях, лучшим вариантом служит выбор электролитических конденсаторов неполярных, т.е.  $C_2$ .

## 2.5 Выбор схемы включения полярных конденсаторов

При компенсации реактивной мощности в однофазной сети конденсатор подключают параллельно индуктивной нагрузке. В трехфазной сети используют схему «треугольника», либо «звезда». Поскольку реактивная мощность конденсаторов пропорциональна квадрату напряжения, то по критерию мощности используют схему «треугольника», при которой реактивная мощность батареи в 3 раза больше, чем при схеме «звезда». При этом для бумажных конденсаторов в сравниваемых вариантах затраты на приобретение и монтаж одинаковы.

Полярные конденсаторы в устройствах компенсации включают по более сложным схемам, одна из которых показана на рисунке 2.3. Она обеспечивает прохождение тока через конденсаторы с требуемой полярностью.

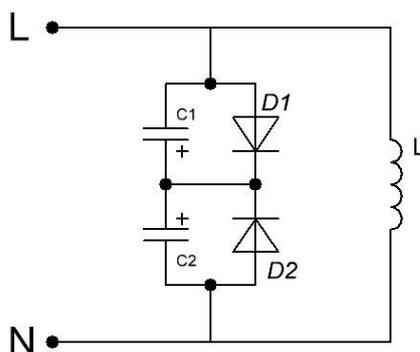


Рисунок 2.3 - Схема включения полярных конденсаторов в однофазную сеть

Для схемы «звезда» и «треугольник» включение представлено на рис. 2.2.

Показан общий случай, когда каждое плечо состоит из  $n$ -последовательно и  $m$ -параллельно соединенных конденсаторов. Причем для танталовых образцов (поскольку  $U_n = 50 В$ ) может быть  $n = 6 \dots 10$ .

При большом числе конденсаторов возникает задача оценки стоимости компенсирующего устройства при использовании схемы «звезда» и «треугольника».

Примем линейную аппроксимацию стоимости одного конденсатора  $Z$

$$Z = aC + bU, \quad (2.26)$$

где  $a$  - удельная стоимость емкости (руб./мкФ),  $b$  - удельная стоимость напряжения конденсатора (руб./В),  $C$ ,  $U$  - емкость и напряжение конденсатора, мкФ и В.

Количество конденсаторов в одном плече одной фазы. Для последовательной ветви:

$$n = U / U_i,$$

для параллельной:

$$m = C / C_i,$$

где  $U$ ,  $C$  – расчетные значения напряжения и емкости конденсатора;  $U_i$ ,  $C_i$  - напряжение и емкость, приходящиеся на конденсатор в схеме «звезда» и «треугольник». Следует учитывать, что в первой схеме требуемая емкость в три раза больше, чем во второй, что обеспечивает в них равенство реактивной мощности всей компенсирующей установки.

Запишем уравнения стоимости конденсаторов для рассматриваемых схем с учетом рис. 2.2 и вышеприведенных данных:

«звезда»

$$Z_Y = 12 (maC + nbU), \quad (2.27)$$

«треугольник»

$$Z_{\Delta} = 12 \left( \frac{m}{3} aC + 1,7nbU \right). \quad (2.28)$$

В уравнениях не учитываются равные для сравниваемых схем стоимости диодов и шунтирующих резисторов.

Условие экономической эффективности схемы «треугольник» определяется очевидным неравенством

$$Z_{\Delta} - Z_Y < 0. \quad (2.29)$$

Подставим сюда уравнения (2.27), (2.28) и получим искомое выражение

$$0,33maC + 1,7nbU - maC - nbU < 0. \quad (2.30)$$

Из справочных данных выбираем  $C$  и  $U$  конденсаторов, которые обеспечивают требуемые параметры компенсирующего устройства. По этим же данным определяем удельные значения  $a$  и  $b$ . Тогда по неравенству (2.30) находим предпочтительность схемы «треугольник» по стоимости конденсаторов. Такой расчет удобно использовать, например, для танталовых конденсаторов, у которых небольшие величины номинальных значений напряжения и емкости. Для электролитических конденсаторов  $KЭ$  и  $ЭМ$ , имеющих широкий ряд емкостей и напряжений, всегда можно подобрать значения емкости и напряжения, при которых  $m = n = 1$ . Тогда условие (2.29) упрощается к виду  $Z_{\Delta} = Z_Y$ . Это означает равенство затрат на конденсаторы, при любой схеме соединения.

## 2.6 Обоснование места включения конденсаторных установок

Сельская низковольтная электрическая сеть в расчетном варианте представляет собой трансформаторную подстанцию с трансформатором 10/0,4 кВ, от которой отходят три линии; первая с коммунально-бытовой активной нагрузкой; вторая с активно-индуктивной нагрузкой, сосредоточенной в конце линии; третья с активно-индуктивной нагрузкой, распределенной вдоль линии. Более детальные сведения представлены в таблице.

В первой линии компенсирующие устройства устанавливать не целесообразно.

Во второй линии наибольший эффект будет при включении конденсаторов у группы активно-индуктивных нагрузок. Другими словами, здесь необходимо использовать схему индивидуальной компенсации. В этом случае по линии протекает только активный ток и технические потери в ней снижаются до расчетного минимума.

В третьей линии нельзя сразу указать самый эффективный вариант места включения конденсаторов. Поэтому рассмотрим решение этой задачи.

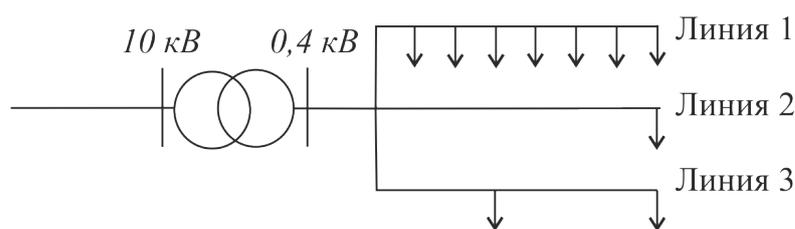


Рисунок 2.4 - Схема сельской низковольтной сети

На рисунке 2.5 показана расчетная схема сельской низковольтной сети, содержащей линию 1 с распределенной коммунально-бытовой нагрузкой, линию 2 с сосредоточенной в конце активно-индуктивной нагрузкой, линию 3 с переменной по длине активно-индуктивной нагрузкой.

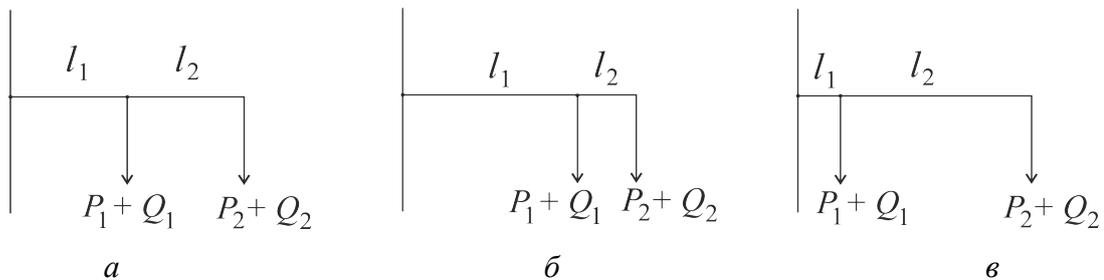


Рисунок 2.5 - Расчетные схемы: а) общий случай; б) нагрузка сосредоточена в конце линии; в) нагрузка сосредоточена в начале линии

Для линии 3 показаны частные схемы. Среди них а) равномерная нагрузка, б) сосредоточенная в конце и в) сосредоточенная в начале. Переход от общего к частным случаям осуществляют изменение длин  $l_1$ ,  $l_2$  и мощностей  $P_1$ ,  $Q_1$ ;  $P_2$ ,  $Q_2$ . Например при  $l_1 = 0$ ,  $(P_1 + Q_1) = 0$  имеем нагрузку, сосредоточенную в конце линии. Если  $l_2 = 0$ ,  $(P_2 + Q_2) = 0$ , то нагрузка сосредоточена в начале линии.

Потери мощности в линии определяются известным выражением

$$\Delta S = \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U^2} R_i, \quad (2.31)$$

где  $P_i$ ,  $Q_i$  – активная и реактивная мощности линии,  $kВт$  и  $kВар$ ,  $R_i$  – активное сопротивление линии,  $Ом$ ,  $U$  – напряжение в линии,  $В$ .

После преобразования можно получить для потерь активной мощности  $\Delta P_i$

$$\Delta P_i = \frac{P_i^2}{U^2 \cos^2 \varphi} R_i, \quad (2.32)$$

Эта закономерность ярко отражает влияние компенсации реактивной мощности на снижение потерь мощности в линии. Если принять, что при активной нагрузке ( $\cos \varphi = 1,0$ ) потери составляют 10 % от номинальной мощности, то с уменьшением коэффициента мощности потери резко возрастают, как показано на рисунке 2.6.

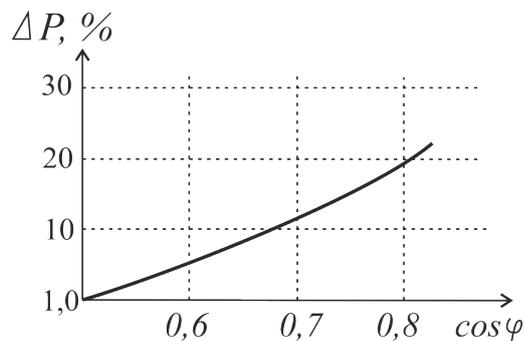


Рисунок 2.6 - Зависимость потерь от коэффициента мощности

Для нашей задачи важен эффект снижения потерь. Из рисунка 2.6 видно, что если для исходного  $\cos \varphi = 0,7$  потери будут 20 %, то доведение коэффициента мощности до нормативного значения ( $\cos \varphi = 0,96$ ) потери снизятся в два раза.

Теперь рассмотрим общий случай по рисунка 2.5 а. Примем, что у каждой нагрузки с активной  $P_1$ ,  $P_2$  и индуктивной  $Q_1$ ,  $Q_2$  мощностью включены реактивные мощности (конденсаторы)  $Q_{1c}$ ,  $Q_{2c}$ . Требуется определить, как распределить эти емкости, чтобы добиться заданного  $\cos \varphi$ .

Снижение мощности на участках  $R_2$  и  $R_1$  определяется выражениями:

$$\Delta S_2 = (P_2^2 + (Q_{2L} - Q_{2C})^2) \frac{R_2}{U^2}, \quad (2.33)$$

$$\Delta S_1 = (P_2^2 + (Q_{2L} - Q_{2C})^2 + P_1^2 + (Q_{1L} - Q_{1C})^2) \frac{R_1}{U^2}. \quad (2.34)$$

На первом этапе, для упрощения анализа, принимаем низкое значение  $\cos \varphi$ , т.е.  $P_1 = P_2$  и полную компенсацию индуктивной мощности. Тогда суммарные потери составят (сумма (2.33) и (2.34))

$$\Delta S_1 + \Delta S_2 = (Q_{2L} - Q_{2C})^2 \frac{R_2}{U^2} + (Q_{2L} - Q_{2C})^2 + (Q_{1L} - Q_{1C})^2 \frac{R_1}{U^2} P_2. \quad (2.35)$$

Отсюда видно, что  $\Delta S_1$  и  $\Delta S_2$  равны нулю при равенстве индуктивной и емкостной нагрузок у каждого потребителя. При этом размещение нагрузок вдоль линии не имеет значения, т.е. при любом сочетании  $R_1$  и  $R_2$ . Таким образом, индивидуальная компенсация дает наибольшее снижение потерь.

Теперь по такому же энергетическому критерию сравним централизованную и групповую компенсации. Для этого удобнее применить

векторный анализ активных и реактивных токов в линии. Такое сопоставление показано на рисунке 2.7.

Рисунок 2.7 а, соответствует варианту, когда в точках включения нагрузок  $S_2$  и  $S_1$  присоединены КУ, реактивные мощности которых  $Q_{2c}$  и  $Q_{1c}$  равны соответствующим индуктивным мощностям потребителей:  $Q_{2L}=Q_{2C}$ ;  $Q_{1L}=Q_{1C}$ . То же справедливо для токов:  $I_{2н} = I_{2c}$ ,  $I_{1н} = I_{1c}$ . В идеализированном случае эти токи разнонаправлены и компенсируют друг друга. На участках  $R_2$  и  $R_1$  потерь от реактивных токов нет:  $\delta P_2 = 0$ ;  $\delta P_1 = 0$ .

Вариант рисунка 2.7 б соответствует включению КУ только у нагрузки  $S_2$  при условии  $I_{2н} = I_{2c}$ . Такой случай обеспечивает компенсацию потерь только на участке  $R_2$ . На участке  $R_1$  сохраняются потери от индуктивного тока  $\Delta P = I_{1н}^2 R_1$ . В целом  $\delta P_2 = 0$ ,  $\delta P_1 \neq 0$ .

Вариант рисунка 2.7 в предполагает включение КУ тоже у потребителя  $S_2$ , но с перекомпенсацией так, чтобы емкостной ток мог компенсировать индуктивный ток у нагрузке  $S_1$  как видно перекомпенсация создает потери от емкостного тока, т.е.  $\delta P_2 \neq 0$ . При этом происходит полная компенсация на участке  $R_1$ , т.е.  $\delta P_1 = 0$ .

Аналогичным путем на рисунке 2.7 г и д рассмотрены варианты включения КУ только у нагрузки  $S_1$ : рисунок 2.7 г с полной компенсацией; рисунок 2.7 д – с перекомпенсацией. Для этих случаев имеем соответственно  $\delta P_1 = 0$  и  $\delta P_1 \neq 0$ , а на втором участке  $R_2$  сохраняются потери от индуктивного тока нагрузки когда  $\delta P_2 \neq 0$ .

Полученные результаты опять свидетельствуют об эффективности индивидуальной компенсации у всех потребителей. Варианты перекомпенсации в конце или в начале линии не позволяют снизить потери до нуля. Если же проследить суммарное снижение потерь, то можно заметить необходимость учета значений  $R_1$  и  $R_2$  при выборе компенсирующей мощности – чем больше величина  $R$ , тем больше должна быть компенсирующая мощность в конце участка.

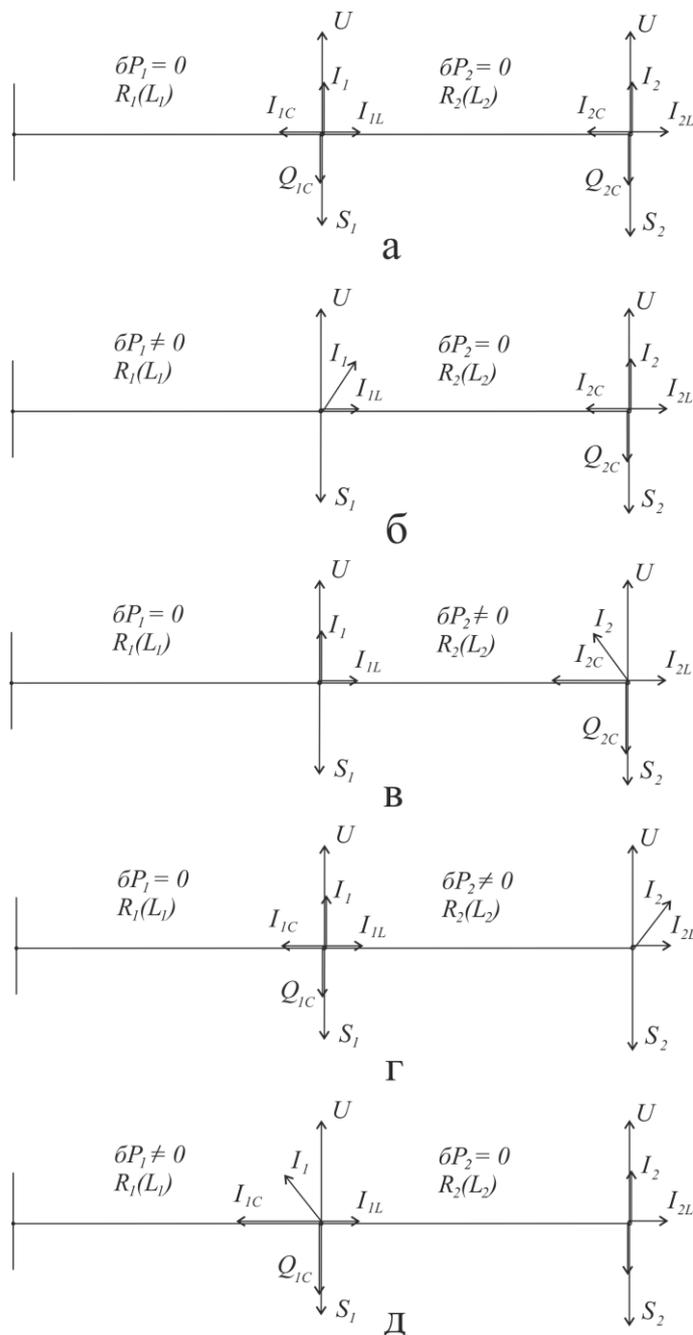


Рисунок 2.7 – Условное обозначение параметров нагрузок

Итоговые данные анализа места включения КУ показаны в табл. 2.8.

Таблица 2.8 - Характеристики способов компенсации реактивной мощности

Способ компенсации (место включения)	Режим компенсации	Потери от реактивной мощности		
		на участке $R_2$	на участке $R_1$	суммарные
1	2	3	4	5
1. Индивидуальная ( $R_2; R_1$ )	нормальная компенсация	$\delta P_2 = 0$	$\delta P_1 = 0$	$\delta P = 0$

1	2	3	4	5
2.Групповая ( $R_2$ )	нормальная компенсация	$\delta P_2 = 0$	$\delta P_1 \neq 0$	$\delta P \neq 0$
3.Групповая ( $R_2$ )	перекомпенсация	$\delta P_2 \neq 0$	$\delta P_1 = 0$	$\delta P \neq 0$
4.Групповая ( $R_1$ )	нормальная компенсация	$\delta P_2 \neq 0$	$\delta P_1 = 0$	$\delta P \neq 0$
5.Групповая ( $R_1$ )	перекомпенсация	$\delta P_2 \neq 0$	$\delta P_1 \neq 0$	$\delta P \neq 0$

Подводя результаты исследования, можно отметить, что по энергетическому критерию самая эффективная является индивидуальная компенсация. Если учитывать экономический критерий, то следует иметь в виду, что с ростом числа КУ возрастает их стоимость. Чтобы расширить область применения компенсации реактивной мощности следует искать способы снижения затрат на КУ. Одним из таких направлений служит применение полярных конденсаторов, имеющих небольшие затраты на единицу реактивной мощности и малые габариты.

## 2.7 Устройство целевой компенсации реактивной мощности

Индивидуальная компенсация является самой эффективной. Однако при устройстве батарей конденсаторов в месте подключения электроприемников приводит к тому, что общая стоимость электроприемника возрастает на величину стоимости устройства компенсации. Вместе с этим важно знать время использования данной электроустановки, поскольку малое время использования в течение года приводит к тому, что устройство компенсации не окупается за весь срок эксплуатации. Что учесть такое положение, необходимо применять устройство компенсации целенаправленно на различные электроустановки.

В сельскохозяйственном производстве существуют такие процессы, где работа электроприводов осуществляется поочередно (перемешивание и раздача кормов, электроприводы насосов водоснабжения, агрегаты переработки зерна и т.п.). Для таких режимов можно использовать одно устройство компенсации

реактивной мощности для нескольких электродвигателей (рис. 2.8), при условии одинаковой или близкой к одинаковой их мощности.

Проведем анализ целевой компенсации.

Удельные капиталовложения в индивидуальную компенсацию реактивной мощности на количество сэкономленной электроэнергии  $\kappa_{уик}$  на 3 электродвигателя

$$\kappa_{уик} = \frac{C_1}{\Delta P_1 T_{1u}} + \frac{C_2}{\Delta P_2 T_{2u}} + \frac{C_3}{\Delta P_3 T_{3u}}, \quad (2.36)$$

где  $C_1, C_2, C_3$  – стоимость батарей конденсаторов для 1, 2, 3 двигателей, руб.;  $\Delta P_1, \Delta P_2, \Delta P_3$  – количество сэкономленной электроэнергии за час работы 1, 2, 3 электродвигателя, кВт;  $T_{1u}, T_{2u}, T_{3u}$  – продолжительность использования 1, 2, 3 электродвигателя в году, ч.

Примем условие, что электродвигатели имеют одинаковую мощность и продолжительности использования в году, а стоимость батарей конденсаторов для этих двигателей одинакова, то получим удельные капиталовложения при индивидуальной компенсации

$$\kappa_{уик} = \frac{C}{\Delta P T_u}. \quad (2.37)$$

Тогда удельные капиталовложения при целевой компенсации с учетом этих же условий

$$\kappa_{уик} = \frac{C + C_{cx}}{\Delta P * 3T_u}, \quad (2.38)$$

где  $C_{cx}$  – стоимость элементов и сборки схемы целевой компенсации, руб.

Если стоимость элементов и сборки схемы целевой компенсации пренебрежимо мала, то удельные капиталовложения

$$\kappa_{уик} = 0,33 \frac{C}{\Delta P * T_u}. \quad (2.39)$$

Таким образом, целевая компенсация реактивной мощности (КРМ) позволяет повысить продолжительность использования батарей конденсаторов, а также снизить затраты на устройство КРМ. Из выражения 2.39 видно, что при идеальных условиях целевая компенсация в 3 раза позволяет повысить

эффективность использования батарей конденсаторов в схемах использования для трех одинаковых по мощности электродвигателей.

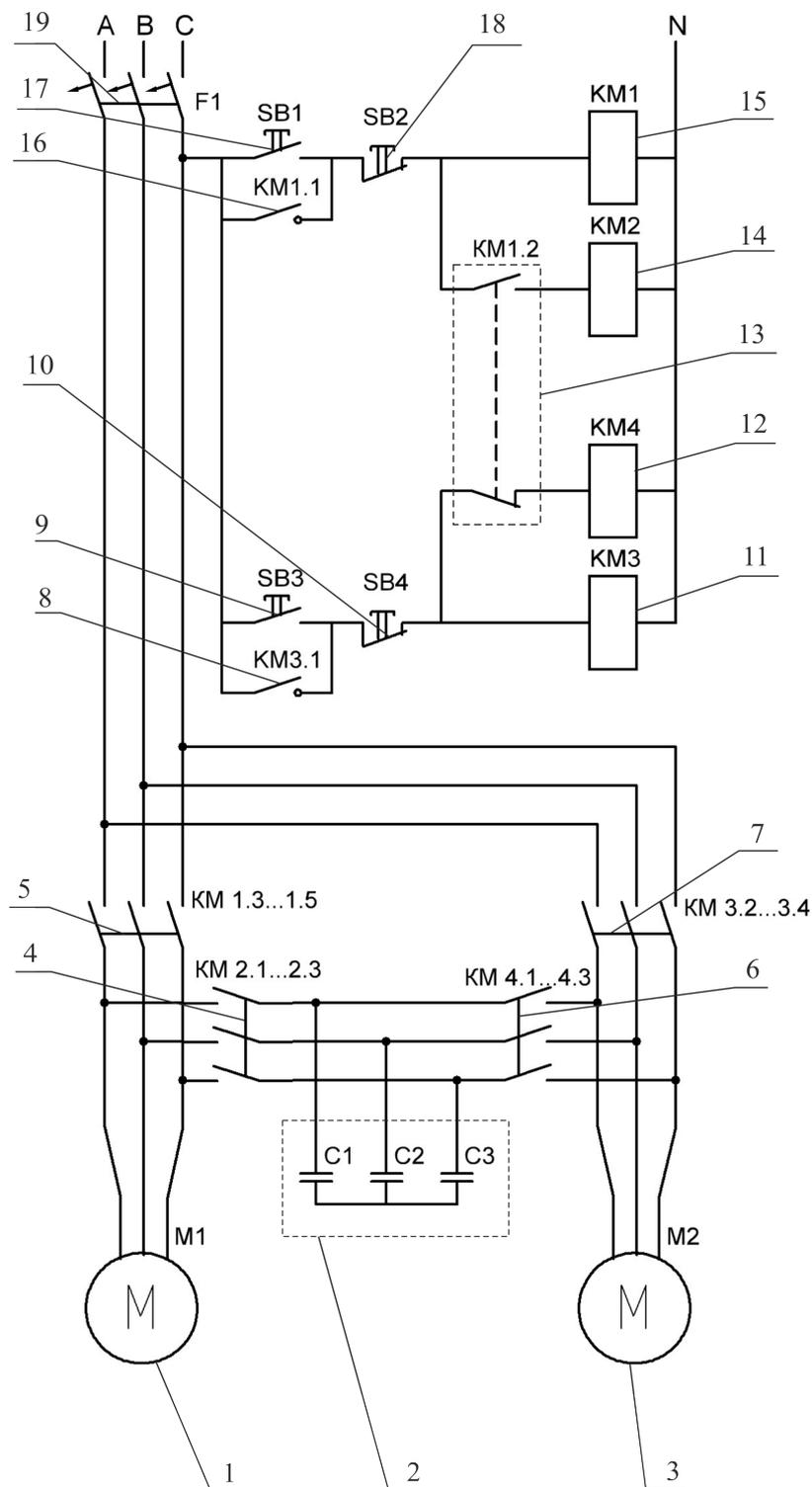


Рисунок 2.8 – Схема целевой компенсации реактивной мощности  
 1 – электродвигатель №1; 2 – батарея конденсаторов; 3 – электродвигатель №2; 4 – контакты магнитного пускателя №2; 5 – контакты магнитного пускателя №1; 6 – контакты магнитного пускателя №4; 7 – контакты магнитного пускателя (МП) №3; 8 – нормально разомкнутый (НР) контакт МП №3; 9, 10 – кнопки пуск, стоп электродвигателя №2; 11, 12 – МП №3 и МП №4; 13 – переключатель МП №1; 14, 15 – МП №2 и МП №1; 16 – НР контакт МП №1; 17, 18 – кнопки пуск, стоп электродвигателя №1; 19 – автоматический выключатель

Работает предлагаемая схема следующим образом. При включении автоматического выключателя и кнопки пуск электродвигателя №1 (ЭД1) замыкается цепь катушки МП №1 все его контакты. ЭД1 включается в работу. Одновременно питается катушка МП №2, который замыкает свои контакты и включается батарея конденсаторов. Процесс компенсации реактивной мощности осуществляется для ЭД1.

При включении второго электродвигателя №2 (ЭД2), компенсация осуществляется для первого ЭД1, так как переключатель МП №1 механически разрывает цепь катушки МП №4 и его контакты разомкнуты, чтобы не допустить короткого замыкания цепи.

При отключении ЭД1, автоматически разрывается цепь катушки МП №2 и замыкается цепь катушки МП №4, который замыкает свои контакты. Осуществляется компенсация для ЭД2.

## 2.8 Выводы по главе

1. При исследовании проблемы компенсации реактивной мощности все многочисленные и разнообразные сельские сети целесообразно представить объектом изучения, состоящие из подстанций 10/04 кВ и тремя отходящими линиями: 1 - с бытовой нагрузкой, длиной 900 м; 2 - с силовой нагрузкой, длиной 250...500 м; 3 - со смешенной нагрузкой длиной 500...800 м.

2. Компенсацию реактивной мощности можно осуществлять бумажными, косинусными, полярными и неполярными конденсаторами.

3. Для выбора эффективного типа конденсаторов сформировано и решена задача в условиях неопределенности. Матрица решений учитывает три типа конденсаторов и три типа сельских сетей. По критерию Вальда доказано, что лучшими служат полярные конденсаторы.

4. Шкала параметров полярных конденсаторов не совпадает со шкалой асинхронных двигателей. Для их согласования предложено комплектовать устройство компенсации из батарей конденсаторов и определять экономические границы выбора лучшего варианта.

5. Качественным анализом мест присоединения конденсатора к сети выявлено целесообразность применения индивидуальной компенсации и показано, что полярные конденсаторы могут располагаться на клеммной коробке двигателя или в магнитном пускателе.

6. Выявлены предпочтительные схемы управления компенсирующими устройствами.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИМИ КОНДЕНСАТОРАМИ

Целью выполнения данной главы является подтверждение теоретических положений, а именно, обоснование и проверка компенсации реактивной мощности полярными электролитическими конденсаторами, подключенными с полупроводниковыми диодами, в цепи переменного тока.

#### 3.1. Программа испытаний

Проверка работы устройства индивидуальной компенсации заключается в установлении закономерности процесса компенсации потребления реактивной мощности (РМ) полярными электролитическими конденсаторами.

Устройство, помимо конденсаторов, включает в себя полупроводниковые диоды, подключенные в соответствии с рисунком 3.1.

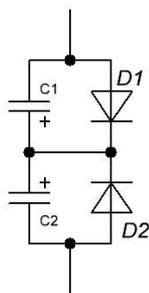


Рисунок. 3.1 - Устройство индивидуальной компенсации на основе полярных электролитических конденсаторов (C1 и C2 – полярные конденсаторы, D1 и D2 – шунтирующие диоды)

Работа в отдельном виде полярных электролитических конденсаторов в цепях переменного синусоидального тока приводит к их скоротечному разрушению, так как условия прохождения тока в них различные. Условия создаются из-за особой химической реакции взаимодействия между диэлектриком и электролитом. При обратном протекании зарядов через полярный конденсатор, свойства диэлектрического материала теряются,

происходит химическое разрушение диэлектрика, вследствие чего увеличивается сила тока и происходит вскипание электролита [1]. На основании анализа о компенсации реактивной мощности предлагаемым устройством, можно сформулировать условия эксперимента:

- выполнение требований правил безопасности использования полярных электролитических конденсаторов;
- габаритные размеры компенсирующего устройства не должны превышать размеров клеммной коробки электродвигателя;
- параметры оборудования экспериментального стенда должны соответствовать параметрам компенсирующего устройства;
- емкость полярных электролитических конденсаторов должна обеспечивать полную или частичную компенсацию реактивной мощности для повышения коэффициента мощности.

Как было отмечено ранее, подключение диодов согласно схеме на рисунке 3.1. позволяет исключить движение зарядов в обратном направлении. Определим характер колебания тока и напряжения на данном устройстве с помощью осциллографа.

После предварительной проверки работы устройства на переменном напряжении, необходимо установить параметры этой схемы в однофазном режиме, а затем в режиме работы трехфазного асинхронного двигателя. Чтобы проверить величину и характер компенсации РМ.

Проверка и расчет параметров элементов схемы ограничивается исходными данными экспериментальной установки. Основными определяющими параметрами устройства компенсации является напряжение, ток, частота, мощность, емкость.

Большую долю потерь занимают потери в сетях напряжением 380 В. При этом полярные электролитические конденсаторы рассчитаны на номинальное постоянное напряжение от 6,3 до 600 В [1,55]. Поэтому их применение для электроприемников, работающих на напряжение 380 В особенно актуально.

На основе анализа потребителей реактивной мощности в сельском хозяйстве значительная доля приходится на электродвигатели мощностью от

0,5 до 7,5 кВт напряжением 380/220 В. Для установления закономерностей компенсации РМ полярными электролитическими конденсаторами необходимо собрать экспериментальную установку с электрическим двигателем мощностью в указанном диапазоне. Значение и свойства потребления реактивной мощности на холостом ходу отличаются от потребления РМ под нагрузкой. Это зависит от типоразмера электродвигателя, свойств магнитопровода статора, характера нагрузки, параметров источника питания и т.д. Чтобы учесть это в экспериментальной установке, необходимо установить полные данные выбранного электродвигателя, подобрать устройство его загрузки. Нагрузочное устройство должно обеспечивать изменение усилия на вал, чтобы провести проверку работы двигателя на 70, 80, 90, 100 % загрузки. Также необходимо отслеживать данные питающей сети: напряжение, ток, мощность; с помощью измерительных приборов.

Отдельное внимание необходимо уделить запуску двигателя, поскольку в режимах запуска происходит наибольшее потребление реактивного тока из сети. При этом запуск электродвигателя продолжительностью от 3 до 5 секунд негативно влияет как на сеть, так и на магнитные особенности самого электродвигателя. В этом случае компенсировать реактивный ток и сократить время запуска возможно с помощью УКПК. Исследуем режимы запуска электродвигателя при различных источниках его питания.

## **3.2 Описание экспериментальных установок**

### **3.2.1 Описание установки проверки УКПК в трехфазном режиме**

Использование предлагаемого устройства в качестве индивидуального компенсатора в цепях переменного тока напряжением 380 В и ниже ограничивает выбор полярных конденсаторов по напряжению.

Заводами-изготовителями предлагается ряд полярных конденсаторов на постоянное напряжение величиной от 6,3 до 600 В. Это напряжение прямого протекания тока, то есть при соблюдении строгой полярности от «-» к «+». В

обратном направлении без разрушения полярный конденсатор пропускает ток при напряжении всего  $1,5 \text{ В}$ . Это напряжение, называют обратным. Продолжительность приложения обратного напряжения должно составлять не более  $1 \text{ с}$ , в противном случае диэлектрик начнет разрушаться. Однако по [47], включение параллельно полярному конденсатору полупроводникового диода возможно при изменении полярности подачи напряжения. Прямое значение падения напряжения на концах диода составляет порядка  $0,5 \dots 1,5 \text{ В}$ , что допустимо по данным заводов изготовителей для полярных конденсаторов.

Номинальное напряжение конденсатора  $U_n$  указано на корпусе конденсатора – это значение постоянного напряжения, на которое рассчитан конденсатор. Рабочее напряжение конденсатора  $U_p$  – это значение полного напряжения приложенного к конденсатору, включая наложенное импульсное напряжение, на котором осуществляется непрерывная работа. В значение рабочего напряжения входит обратное напряжение. Импульсное напряжение – максимальное кратковременное значение пульсирующего напряжения  $U_u = 1,1U_n$  [2]. В данных заводов изготовителей [1,55] сказано, что значение импульсного напряжения кратковременно (до 5 раз по 1 минуте в течение 1 часа) не должно превышать  $1,1U_n$ . Причем форма импульсного схожа с формой пульсации переменного напряжения. Нормальная работа полярного конденсатора в таком режиме возможна при выполнении условий:

- сумма постоянного и наложенного на него переменного напряжения не должна превышать номинального значения  $U_n$ ;
- полярность напряжения не менялась;
- величина тока пульсация не превышала номинального значения [1].

Известно, что пульсирующее напряжение вызывает пульсацию тока, величина которого зависит от температуры окружающей среды, площади поверхности пластин конденсатора, частоты пульсации и тангенса угла диэлектрических потерь.

Заводами-изготовителями указывается значение максимального пульсирующего тока, а также частота этого тока и номинальное значение температуры окружающей среды. Величина тангенса угла диэлектрических

потерь зависит от многих параметров и определяется как отношение активного тока (тока утечки) к реактивному току (току заряда-разряда). Основным параметром, влияющим, на величину тангенса диэлектрических потерь является температура окружающей среды.

Температура работы конденсатора суммируется из температуры внешнего воздействия на конденсатор и температуру внутренних процессов, вызванных величиной или частотой протекания тока через конденсатор. Как известно, рабочая температура устройств влияет на его основные параметры, в том числе на параметры конденсатора, такие как: емкость, токи утечки, тангенс угла диэлектрических потерь, срок службы. В зависимости от типа конденсатора по его габаритным размерам и теплоизолирующих свойств определяется минимальная и максимальная допустимые рабочие температуры. Значения этих температур указывается на корпусе конденсатора в буквенном или цифровом виде. Диапазон температур составляет от  $-55^{\circ}\text{C}$  до  $+150^{\circ}\text{C}$ .

Параметры конденсатора приведены к температуре  $20^{\circ}\text{C}$ . Так как срок службы с изменением температурного режима работы может сокращаться вдвое, а, указанная на конденсаторе, емкость может изменяться  $\pm 30\%$  соответственно в указанном выше диапазоне температур.

Емкость конденсатора зависит от площади проводимой поверхностей пластин, по которой определяются габаритные размеры конструкции. Номинальное напряжение конденсатора также определяет размеры конструкции, за счет использования в ней конкретного диэлектрика и его толщины. Однако в нашем случае емкость конденсатора необходимо принимать по значению потребления реактивной мощности конкретным электроприемником.

Выбор конденсаторов для эксперимента сводится к определению минимума таких параметров:

- номинальное напряжение,  $V$ ;
- номинальный пульсирующий ток,  $A$ ;
- номинальное значение температуры конденсатора,  $^{\circ}\text{C}$ ;
- емкость конденсатора,  $\text{мкФ}$ .

Принимаем конденсатор типа В43858 марки К50-35, так как он соответствует диапазону напряжений, в котором будет работать устройство компенсации. А также соответствует диапазону номинальных пульсирующих токов и емкостей.

Для обеспечения нормальной работы полярного электролитического конденсатора в цепях переменного тока необходимо выбрать выпрямительный диод.

Диод – элемент электрической цепи, который состоит из двух электродов - слоев ( $p-n$  слои). Существует множество видов диодов неуполупроводниковых (фотодиоды, светодиоды) и полупроводниковых (выпрямительные диоды, варикапы, стабилитроны, и т.д.). В нашем случае рассмотрим выпрямительные диоды, так как диапазон напряжений и токов их работы более соответствует нашему устройству по сравнению с остальными диодами.

Выпрямительные диоды более устойчивы к превышению максимальных и минимальных допустимых рабочих температур и имеют более широкую шкалу напряжений и токов. Заводами-изготовителями предлагаются выпрямительные диоды на напряжение от 1 до 1800 В и ток от 0,1 мкА до 100 А.

Примем кремниевый выпрямительный диод типа 1N5408 маркировка DO-27 с параметрами 1000 В и 3 А. Данный диод можно использовать в сети переменного тока напряжением до 1200 В, основные характеристики которого указаны в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Основные характеристики диода

Наименование показателя	Значение
1	2
Тип диода	Выпрямительный
Максимальное постоянное обратное напряжение, В	1000
Максимальное импульсное обратное напряжение, В	1200
Максимальный прямой (выпрямленный за полупериод) ток, А	30
Максимальный допустимый прямой импульсный ток, А	200
Максимальный обратный ток (при $T = 25^{\circ}\text{C}$ ), мкА	5
Максимальное прямое напряжение (при $T = 25^{\circ}\text{C}$ ), В	1,2
Номинальный прямой ток, А	3
Рабочая температура, $^{\circ}\text{C}$	-65...+150
Корпус	DO201AD

Устройство компенсации, состоящее из двух полярных электролитических конденсаторов и двух выпрямительных диода в соответствии с рисунком 3.1, должно удовлетворять условиям:

- выбранные электролитические конденсаторы должны быть одинаковыми по предъявляемым параметрам (значения емкости, номинального напряжения, максимальной и минимальной допустимых температур, тока) и соответствовать условиям эксперимента;

- выбранные выпрямительные диоды должны быть одинаковыми по параметрам (прямое и обратное значение напряжений, токов, тип полупроводников, корпус) и соответствовать условиям эксперимента;

- соединение элементов устройства должно соответствовать схеме, указанной на рисунке 3.1;

- контактные соединения элементов схемы должны быть спаяны и соответствовать их внутреннему сопротивлению не более 0,01 Ом;

- установка элементов устройства должна быть выполнена на изолированной пластине (плате) для обеспечения безопасного их использования.

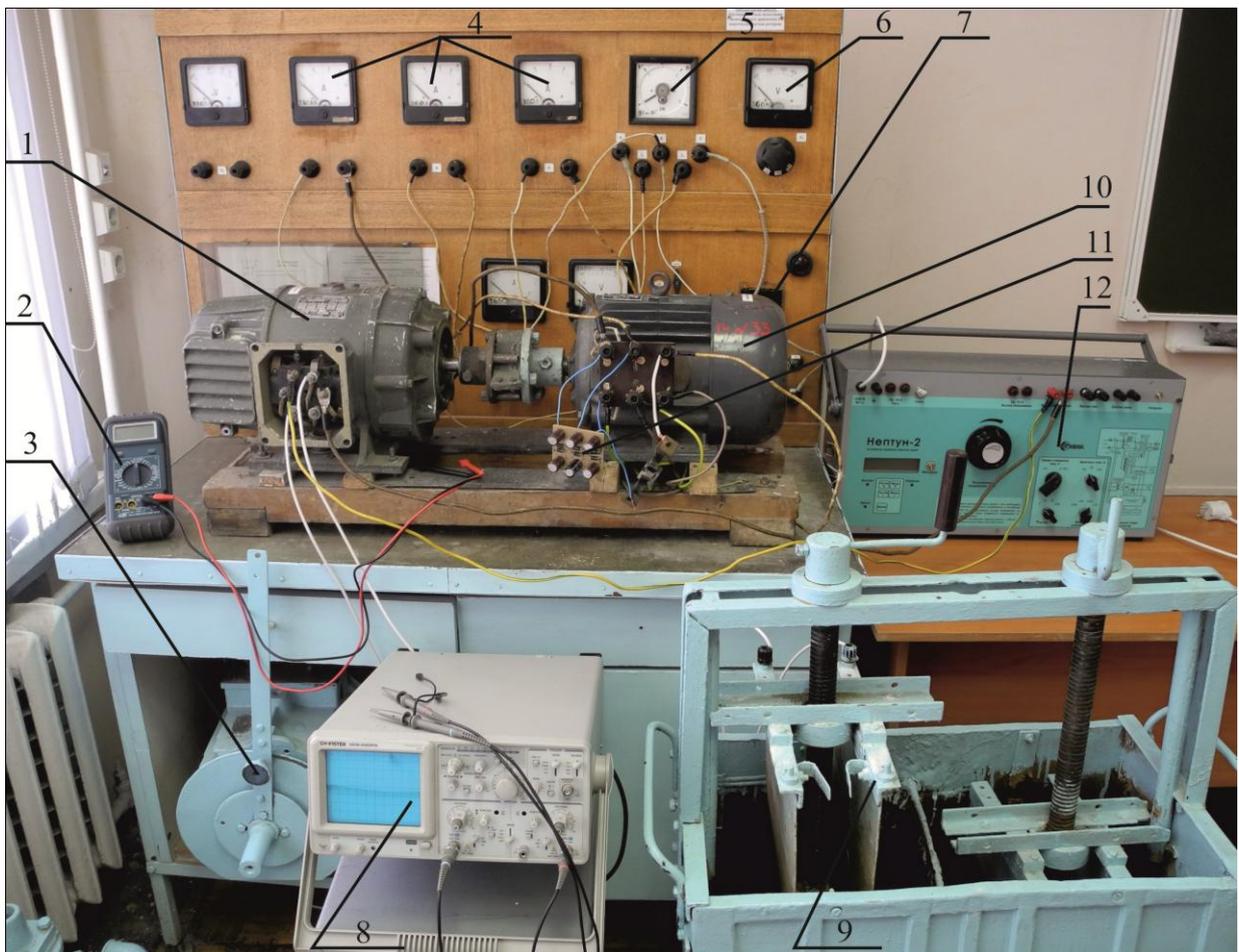


Рисунок 3.2 - Экспериментальная установка: 1 – Двигатель постоянного тока, работающий в режиме генератора; 2 – мультиметр; 3 – индукционный регулятор; 4 – амперметры; 5 – ваттметр; 6 – вольтметр; 7 – автоматический выключатель; 8 – осциллограф; 9 – водяной нагрузочный реостат; 10 – асинхронный электродвигатель; 11 – устройство компенсации реактивной мощности на полярных электролитических конденсаторах; 12 – возбудитель генератора Нептун-2

Соблюдая данные условия и условия эксперимента, определим параметры предлагаемого устройства для проверки его работы в однофазном и трехфазном режимах.



Таблица 3.2 - Оборудование экспериментальной установки

Обозн.	Наименование оборудования	Маркировка	Примечание
A, B, C	Трехфазная переменная сеть	-	-
QF	Автоматический выключатель	АП50-3P-25	-
IP	Индукционный регулятор	MT-11-6 380/220 7,2/12,4	
pA	Амперметр	Э377 0...2А, кл. 1,5	
pV	Вольтметр	Э377 0...500 В, кл. 1,5	
pW	Ваттметр	Ц42303 380 В, 5А	
M1	Асинхронный электродвигатель	АО2-32-6, 220/380 В, 9,3/5,4 А, 2,2 кВт, 950 об./мин., 50 Гц, КПД 81%, cos φ 0,77; S1	
CB	Батарея конденсаторов – устройство компенсации РМ		Окончательно примем элементы устройства после расчета
RR	Водяной нагрузочный реостат	ВР 900х700х300	Раствор воды с солью
M2	Двигатель постоянного тока, включенный в режиме генератора	П-22, 220 В, 5,9 А, 1,0 кВт, 1500 об./мин., S1, КПД 76%, смеш.возб.	Я1, Я2, Д1, Д2, Ш1, Ш2 – выводы якорной, дополнительной и шунтовой обмоток
GE	Возбудитель генератора	Нептун-2	-
FU1, FU2, FU3, FU4	Плавкий предохранитель	ПН-10	Нептун-2
pV, pA	Блок контролируемых параметров напряжения и тока	-	Нептун-2
UB	Переключатель режима работы канала напряжения	-	Нептун-2
R1...3	Магазин сопротивлений	-	Нептун-2
TV	Латр	-	Нептун-2
SF1, SF2, SF3	Выключатель автоматический вторичных цепей	-	Нептун-2
KCT	Реле отключения питания	-	Нептун-2
DD	Микропроцессорный контроллер	-	Нептун-2
UD	Блок питания	-	Нептун-2

### **3.2.2 Описание схем исследования динамической компенсации при пуске асинхронного электродвигателя в программе MATLAB-SIMULINK**

Целью исследования пусковых режимов асинхронного двигателя (АД) является обоснование возможности компенсации реактивного тока и снижение времени запуска АД в сети.

В работе разработана принципиальная электрическая схема устройства компенсации реактивной составляющей пусковых токов АД, выполненная с применением полярных конденсаторов. Данные конденсаторы подключаются к АД только на время его пуска. Длительность пуска АД общепромышленного применения, как правило, составляет не более 2 – 5 сек. Данное обстоятельство позволяет использовать полярные конденсаторы в этой схеме. На рисунке 3.1 представлена принципиальная электрическая схема устройства.

На рисунке 3.4 представлена имитационная виртуальная математическая модель электротехнического комплекса с устройством компенсации пусковых реактивных токов, разработанная на базе программного комплекса MATLAB-SIMULINK, [26] позволяющая исследовать электротехнические процессы при запуске АД от сети.

В момент пуска электродвигателя компенсация реактивного тока называется динамической [9]. Динамическая компенсация рассматривается в работах И. И. Артюхова и С. Ф. Степанова [4]. В работах данных авторов приводится анализ пусковых токов АД. Основу пускового тока составляет реактивный ток, величина которого в 3...8 раз выше значений в установившемся режиме работы АД. Поэтому в этот момент необходимо максимально компенсировать эту реактивную составляющую с помощью динамической компенсации, которая отключается при достижении номинальных оборотов вращения АД. Важным мероприятием динамической компенсации авторами указывается ее применение в сетях с автономным источником питания в виде дизельных электростанций (ДЭС).

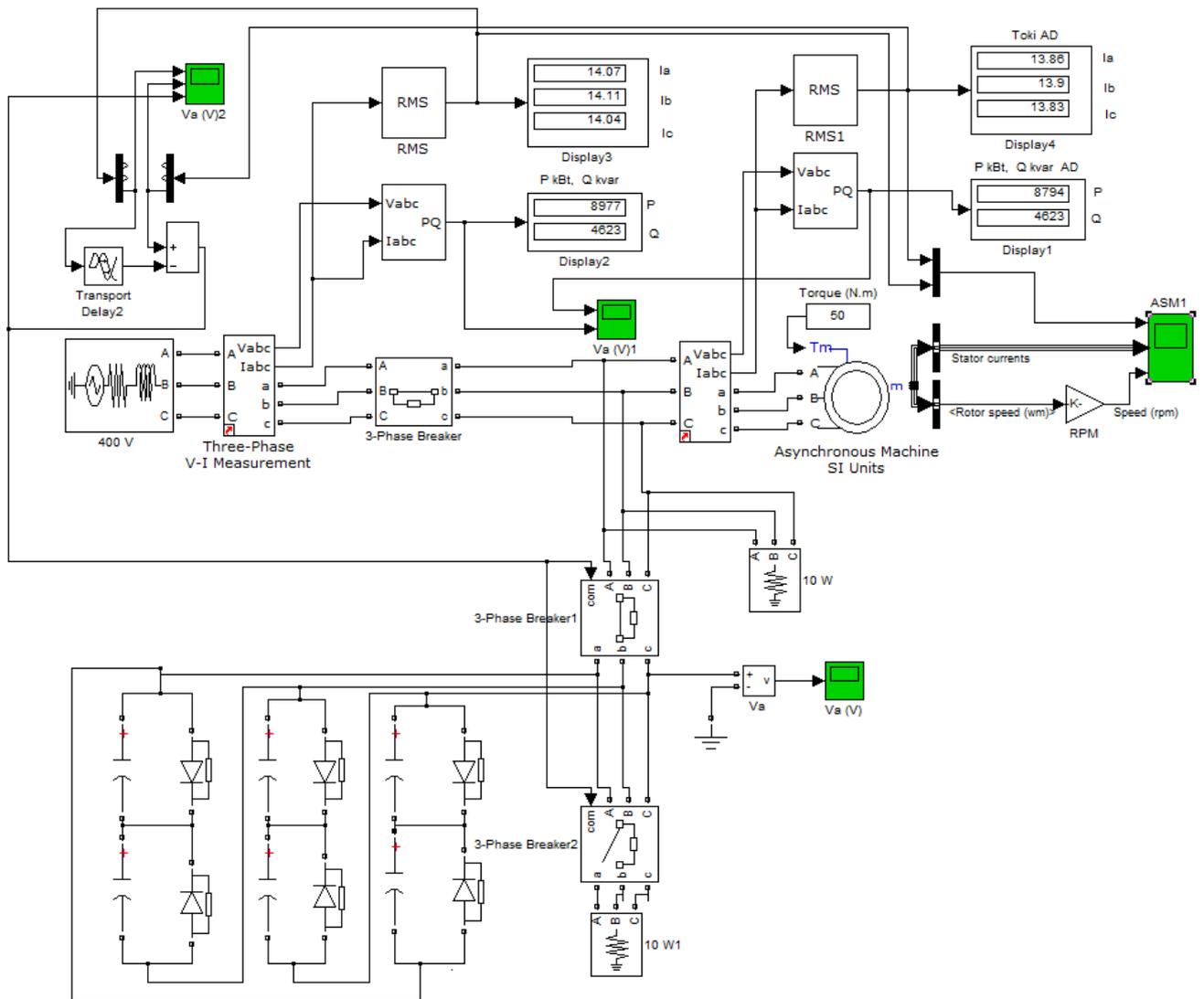


Рисунок 3.4 – Имитационная математическая модель электротехнического комплекса с устройством динамической компенсации пусковых токов АД (обозначения сведены в таблицу 3.3)

Таблица 3.3 – Блоки имитационной математической модели

Обозн.	Наименование
<b>1</b>	<b>2</b>
400 V	Источник напряжения с активно-индуктивным внутренним сопротивлением
1MV	Активная нагрузка
AMS 7500 VAHP	Блок моделирует трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором
SM, Va(v), ASM	Виртуальные осциллографы, для визуального наблюдения за протеканием электромагнитных процессов в схеме
Va	измерительный вольтметр
Torque (N·m)	Блок задания момента нагрузки на вал асинхронного двигателя
Wref(p.u.)	Блок задания скорости вращения ДЭС в относительных единицах
Vtref(p.u.)	Блок задания напряжения возбуждения синхронного генератора
ThreePhaseV-I Measurement	Блок измерения фазных напряжений и токов синхронного генератора

<b>1</b>	<b>2</b>
Display 1...4	Цифровые измерительные приборы для контроля электрических величин;
3-PhaseBreaker	Блоки моделируют трехфазные выключатели
C1...C6, VD1...VD6	Полярные конденсаторы с шунтирующими диодами
Блок 400 V	Моделирует трехфазный источник переменного напряжения 0,4 кВ с активно-индуктивными параметрами
Блоки RMS	Осуществляют вычисление действующих значений различных величин

Также разработана виртуальная математическая модель электротехнического комплекса дизельной электростанции с асинхронным электродвигателем (ДЭС + АД) в программном пакете MATLAB-SIMULINK [97]. Приводится проверка работы данной системы без устройства компенсации УКПК и при подключении УКПК.

Таблица 3.4 – Оборудование имитационной математической модели без компенсирующих конденсаторов

Наименование	Параметры
Дизельная электростанция	Мощность $S = 16 \text{ кВА}$
Асинхронный двигатель	Мощность $P = 7,5 \text{ кВт}$
Нагрузочный момент	$5 \text{ Нм}$

На рисунке 3.5 представлен интерфейс виртуальной математической модели ДЭС и АД без компенсации.

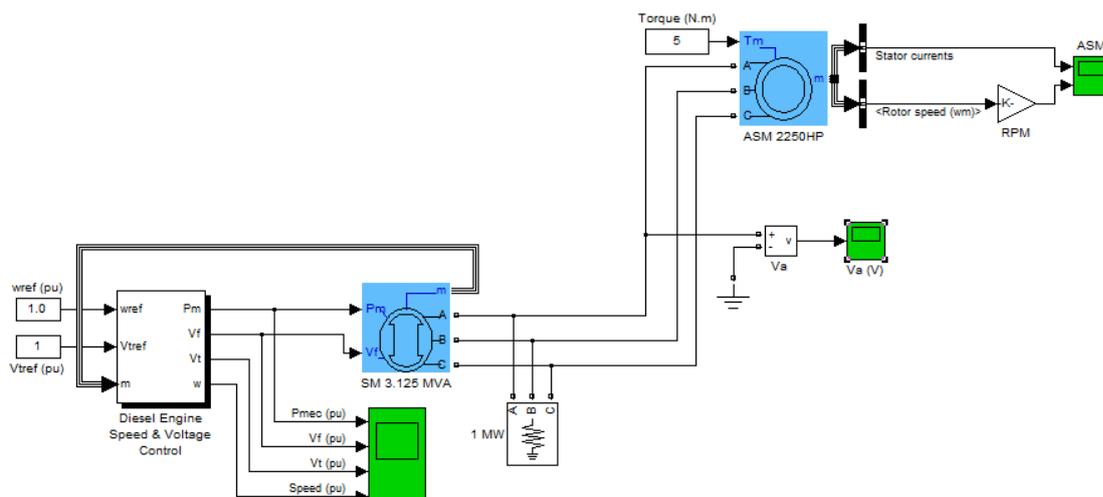


Рисунок 3.5 – Виртуальная математическая модель ДЭС с АД без УКПК (обозначения сведены в таблицу 3.5)

Таблица 3.5 – Блоки имитационной математической модели

Обозн.	Наименование
DieselEngineSpeed&VoltageControl	Моделирует дизельный агрегат и замкнутую систему формирования напряжения возбуждения для синхронного генератора
SM 16000VA 1MV	Моделирует синхронный генератор Активная нагрузка
AMS 7500 VAHP	Блок моделирует трехфазный асинхронный двигатель с Короткозамкнутым ротором
SM, Va(v), ASM	Виртуальные осциллографы, для визуального наблюдения за протеканием электромагнитных процессов в схеме
Va	Измерительный вольтметр
Torque (N·m)	Блок задания момента нагрузки на вал асинхронного двигателя
Wref(p.u.)	Блок задания скорости вращения ДЭС в относительных единицах
Vtref(p.u.)	Блок задания напряжения возбуждения синхронного генератора

Заданные параметры в программе показаны на рисунке 3.6, блоки параметров дизеля и асинхронного двигателя.

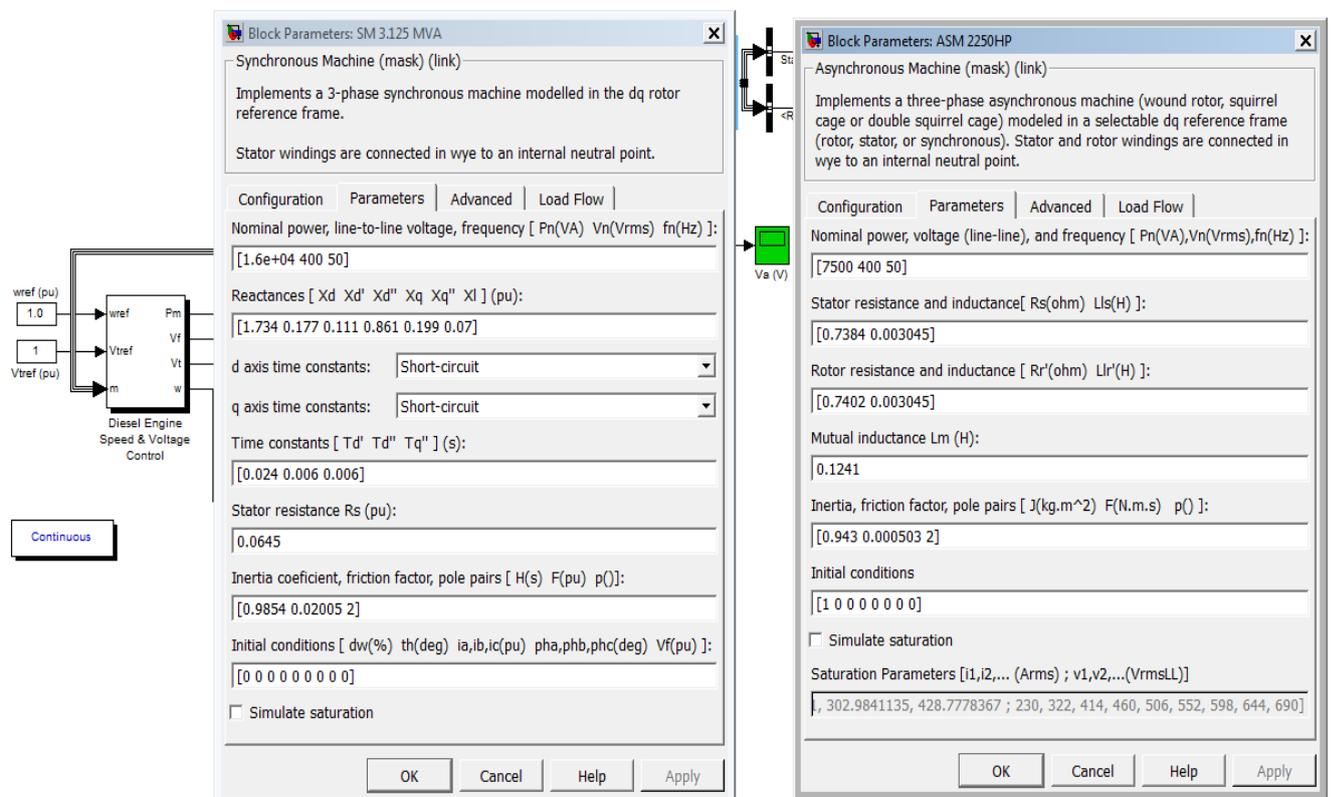


Рисунок 3.6 – Блоки параметров дизеля и асинхронного двигателя

Таблица 3.6 – Оборудование имитационной математической модели при наличии компенсирующих конденсаторов

Наименование	Параметры
Дизельная электростанция	Мощность $S = 16 \text{ кВА}$
Асинхронный двигатель	Мощность $P = 7,5 \text{ кВт}$
Нагрузочный момент	$5 \text{ Нм}$
Конденсаторы	$33 \text{ мкф}$
Время отключения конденсаторов	$1,1 \text{ с.}$

На рисунке 3.7 представлен интерфейс виртуальной математической модели ДЭС и АД с конденсаторами для динамической компенсации реактивной мощности пусковых токов.

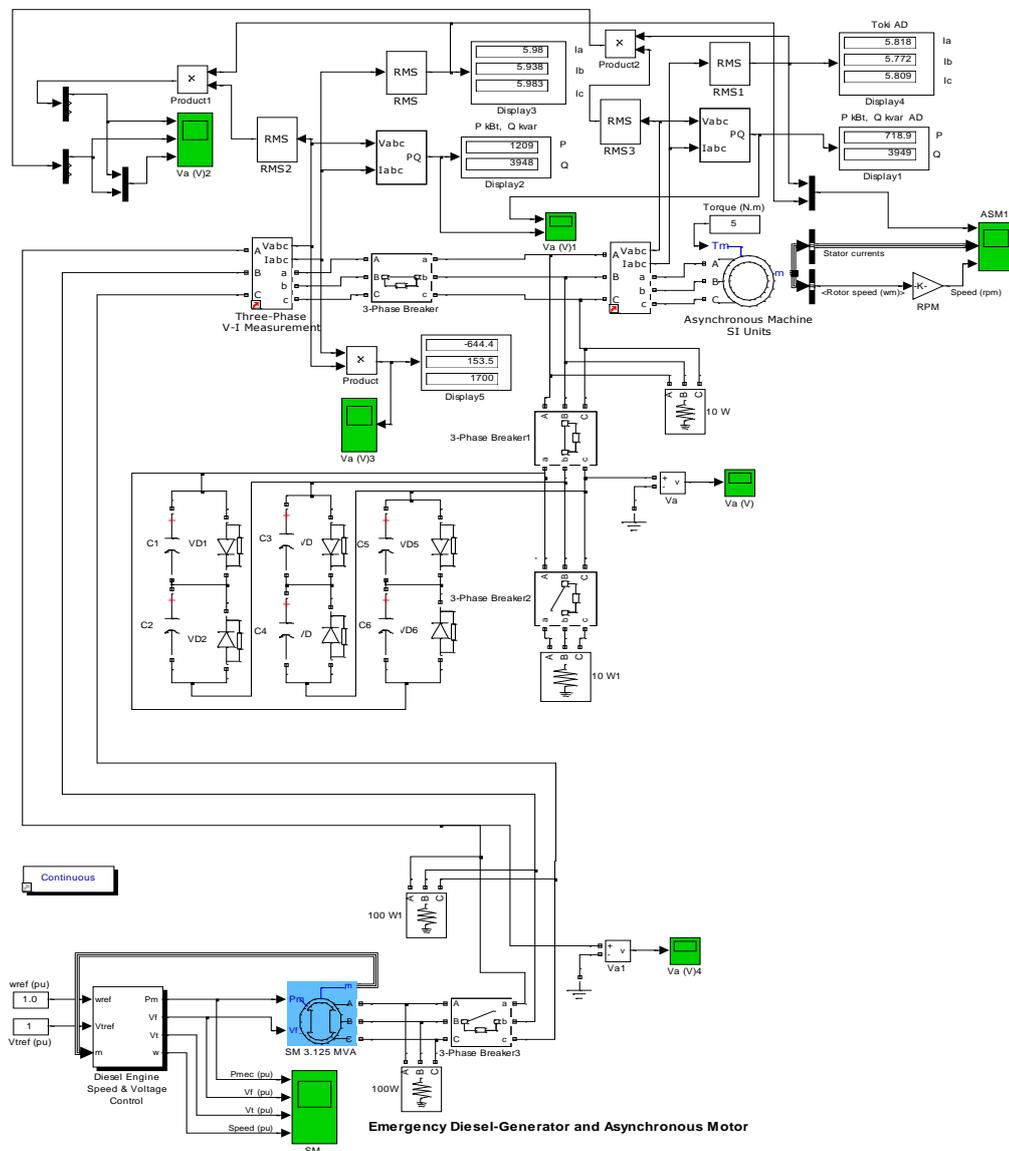


Рисунок 3.7 - Виртуальная математическая модель ДЭС и АД с блоком динамической компенсации реактивной мощности УКПК (обозначения таблицы 3.5)

На рисунке 3.8 представлены параметры генератора и АД в программном виде.

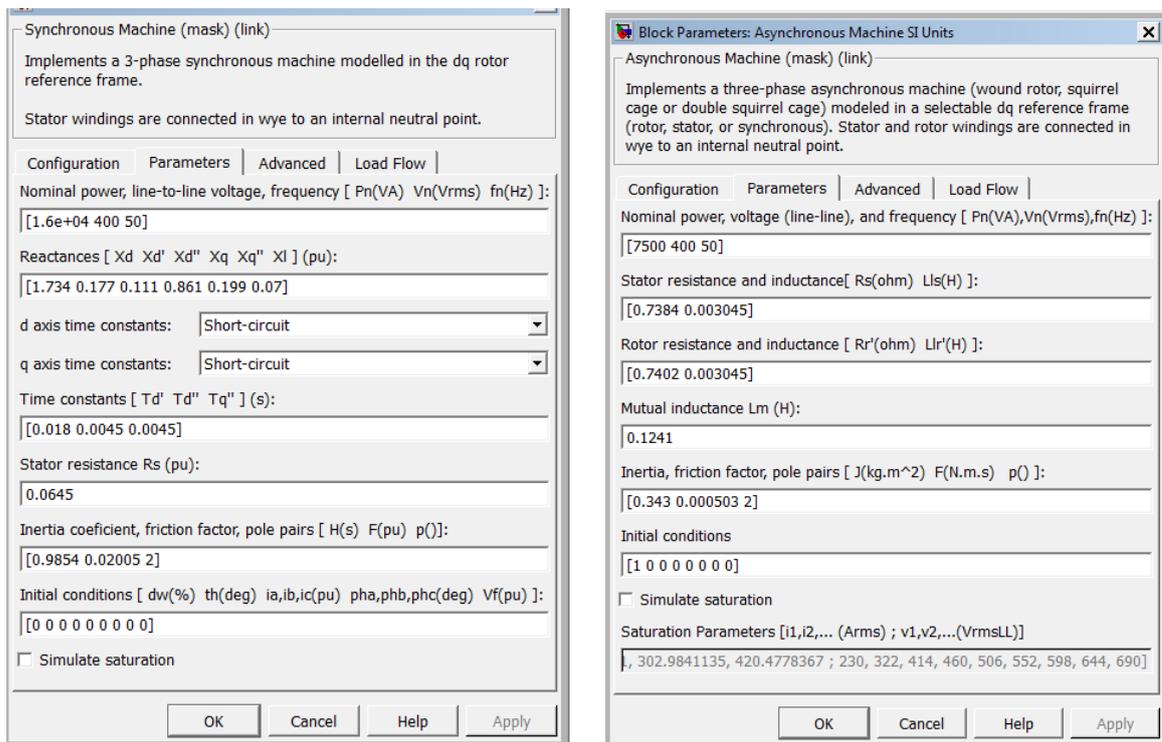


Рисунок 3.8 – Таблицы параметров генератора и асинхронного двигателя

Результаты компьютерного моделирования обсуждаются далее.

### 3.3 Проверка работы устройства в однофазном режиме

Задачей данного параграфа является проверка возможности работы устройства в цепи переменного тока и установление параметров переходных процессов в устройстве.

Для того чтобы проверить работу устройства необходимо:

- сборка устройства по параметрам цепи;
- проверить возможность включения в цепь переменного тока без нагрузки;
- проверить работу устройства под нагрузкой;
- зафиксировать данные параметров цепи и их переходные процессы.

Чтобы собрать устройство в соответствии с параметрами подаваемой нагрузкой в цепь переменного тока необходимо определить параметры конденсаторов и диодов в соответствии с условиями:

$$U_{AC\text{ конд.}} > U_{сети}, \quad (3.1)$$

$$U_{диод.} > U_{сеть} \quad (3.2)$$

$$I_{диод.} > I_{цепи} \quad (3.3)$$

$$I_{AC\text{ конд.}} < I_{AC\text{ max конд.}} \quad (3.4)$$

$$T_{конд.} < T_{\text{max.конд.}}, \quad (3.5)$$

где  $U_{AC\text{ конд.}}$  – импульсное напряжение конденсатора [1], В;  $U_{сети}$  – амплитудное значение напряжения сети, В;  $U_{диод.}$  – номинальное напряжение выпрямительного диода, В;  $I_{цепи}$  – максимальный ток в цепи, обусловленный сопротивлением электроприёмника, А;  $I_{диод.}$  – номинальный прямой ток диода, А;  $I_{AC\text{ конд.}}$  – фактический ток пульсации (переменный) конденсатора [1], А;  $I_{AC\text{ max конд.}}$  – максимально допустимый ток пульсации [1], А;  $T_{конд.}$  – рабочая (фактическая) температура конденсатора, °С;  $T_{цепи}$  – максимально допустимая рабочая температура цепи, °С;  $T_{\text{max конд.}}$  – максимально допустимая рабочая температура конденсатора [1], °С.

Рассмотрим цепь переменного тока, приведенную на рисунке 3.9.

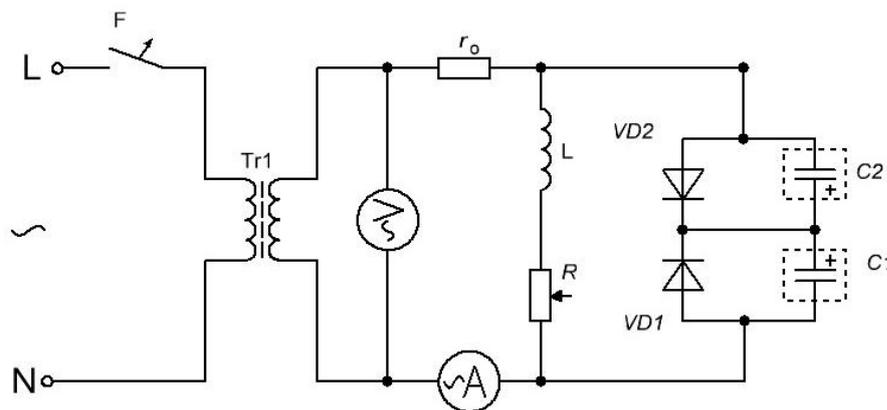


Рисунок 3.9 - Однофазная схема подключения устройства компенсации (обозначения указаны ниже)

В цепь однофазного переменного тока входит автоматический выключатель  $F$ , который обеспечивает защиту цепи от короткого замыкания, латр  $Tr1$ , переменный резистор  $R$  с катушкой индуктивности  $L$  для

регулирования силы тока цепи, измерительные приборы (амперметр –  $A_I$ , вольтметр –  $V_I$ ), а также устройство компенсации  $C1$ ,  $C2$ ,  $VD1$ ,  $VD2$  (таблица 3.7).

**Таблица 3.7 - Оборудование однофазной экспериментальной цепи**

Обоз.	Наименование	Маркировка параметры	Примечание
1	2	3	4
$F$	Автоматический выключатель	ВА47-29 1П С2 $U 230/400 В, I_{cp} 20А$	
$R, L$	Регулируемое сопротивление	BC1-500W $U 0...500 В, R 0...1500 Ом,$ $L = 0,11 Гн, W 500 Вт$	
$r_o$	Внутреннее сопротивление цепи	-	Омическое сопротивление проводника, не более 0,001 Ом (медь, $L = 2 м$ )
$A_I$	Амперметр	Э377 $0...2 А, кл. 1,5$	
$V_I$	Вольтметр	Э377 $0...500 В, кл. 1,5$	
$Tr1$	Латр	УЛ 220-500	
$C1$	Полярный конденсатор №1	B43858 (K50-35) $U 450 В, U_{AC} 495 В,$ $I_{AC} 1,02 А, T 105^{\circ}C,$ $C 22 мкФ$	
$C2$	Полярный конденсатор №2	B43858 (K50-35) $U 450 В, U_{AC} 495 В,$ $I_{AC} 1,02 А, T 105^{\circ}C,$ $C 22 мкФ$	
$VD1$	Выпрямительный диод №1	<b>1N5408 (DO-27)</b> $U 1000 В, I 3 А, T 150^{\circ}C$	
$VD2$	Выпрямительный диод №2	<b>1N5408 (DO-27)</b> $U 1000 В, I 3 А, T 150^{\circ}C$	
<p><math>U</math> – номинальное напряжение, <math>I</math> – номинальный ток, <math>I_{cp}</math> – ток срабатывания, <math>T</math> – максимально допустимая рабочая температура, <math>C</math> – емкость, <math>W</math> – мощность, кл. – класс точности</p>			

Подобранные элементы цепи удовлетворяют условию эксперимента по параметрам. Действующее значение напряжения сети, питающее цепь, составляет 220 В. Тогда по [3] амплитудное значение в  $\sqrt{2}$  раз больше

$$U_{сети} = \sqrt{2} \cdot 220 = 311,12 В.$$

По условиям устройства (3.1), (3.2)

$$495 > 311,12;$$

$$1000 > 311,12.$$

Ток в цепи будет иметь значения в зависимости от сопротивления переменного резистора, а также от реактивного сопротивления устройства компенсации.

Величина полного сопротивления определяется из квадратного корня суммы квадратов сопротивлений активной и реактивной составляющих. Регулирование величины тока осуществляется переменным резистором (реостатом), который является потребителем электроэнергии без реактивной составляющей. Внутреннее сопротивление цепи по сравнению с реостатом очень мало, поэтому им можно пренебречь. Тогда примем два положения реостата: начальное при  $R = 1500 \text{ Ом}$  и рабочее (под нагрузкой)  $500 \text{ Ом}$ , в соответствии с условием (3.4).

Устройство компенсации РМ емкостью  $22 \text{ мкФ}$  в рассматриваемой однофазной цепи по [36] будет стремиться сдвинуть форму тока по фазе в сторону сети, то есть опережая синусоиду напряжения. При условно полной активной нагрузке такое явление можно назвать потреблением реактивной мощности, а не компенсацией. В этом случае устройство компенсации будет негативно сказываться на качестве сети.

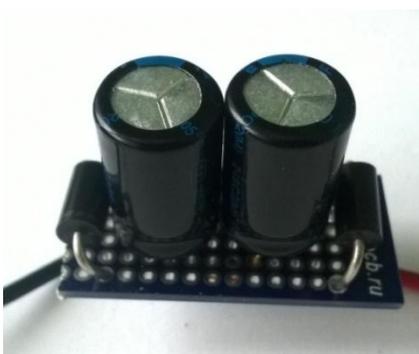


Рисунок 3.10 - Однофазное устройство компенсации РМ

В устройстве включение полярных конденсаторов не является последовательным или параллельным. Указанное значение емкости при встречном включении полярных конденсаторов не изменяется. Так как один полупериод синусоиды тока проходит по одному конденсатору, за которым

сохраняется номинальное значение его емкости, а второй полупериод – через 2-й конденсатор.

На основе принятых данных, рисунка 3.9, 3.10, таблицы 3.7 сведем результаты в таблицу 3.8.

Анализируя переходные процессы, на полярный конденсатор подается импульсное напряжение в виде однополупериодной волны синусоидального напряжения частотой  $50 \text{ Гц}$ . Импульс получается за счет выпрямления волны диодом. Полярность напряжения для конденсаторов соблюдается, то есть заряд-разряд происходит в однополярном виде. Обратное напряжение на конденсаторах имеется и обусловлено обратным напряжением выпрямительных диодов, но не более  $1,0 \text{ В}$  [1], что допустимо по данным заводов-изготовителей. Разряд в обратном направлении не происходит за счет того, что ток протекает по участку цепи малого сопротивления, в нашем случае через диод, а далее полярность опять соблюдается (рисунок 3.11).

Проверим данные соображения на опыте по рисунку 3.11 с помощью осциллографа. Вместе с этим проведем замер температуры конденсаторов и продолжительности работы устройства.

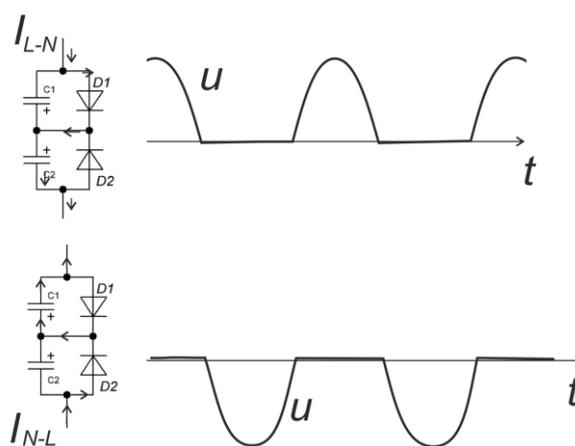


Рисунок 3.11 - Заряд-разряд полярных конденсаторов в цепи переменного тока

Под действиями диодов колебательный процесс переходит в импульсный процесс. Полярные конденсаторы заряжаются одновременно. Разряд происходит того конденсатора, который создает цепь протекания тока (закон Кирхгофа) [28].

Таблица 3.8 - Результаты работы устройства в однофазном режиме

№ П/ П	$U_{\text{сети}}, В$ (действ.)	$U_{\text{сети}}, В$ (амплитуд.)	$R, Ом$	$I, А$	$T, °С$	$t, мин$	Переходные процессы
1	218	307	1500	0,43	25	1	Опыт 1, 3
4	214	301	500	0,73	29	1	Опыт 2, 4
Электрическая схема опыта 1, 3							
Электрическая схема опыта 2, 4							
Опыт 1, 3				Опыт 2, 4			
<b>Примечание к таблице 3.5.</b>							
- осциллограф,  - мультиметр							
Кривую формы синусоиды на концах выпрямительных диодов снимаем с помощью осциллографа GWINSTEKGOS 620FG.							
Измерение температуры корпуса полярных конденсаторов выполним мультиметром VICTORVC97 (термопара -2...+1000 °С).							

Таким образом, анализ данного эксперимента показал, что устройство (рис. 3.10) компенсации РМ полярными электролитическими конденсаторами,

возможно, использовать в цепях переменного тока при данной схеме их подключения.

### **3.4 Компенсация реактивной мощности в схемах с трехфазными асинхронными двигателями**

Целью данного параграфа является проверка работы устройства в трехфазном режиме и установление компенсации реактивной мощности сети.

В качестве электроприемника, рассмотрим трехфазный асинхронный электродвигатель (АД). Потребление реактивной мощности АД зависит от индуктивности обмотки, то есть от его конструктивного исполнения, и мощности, а также от режима загрузки. Если конструктивное исполнение и мощность можно принять за исходные данные, то загрузка АД является неопределенным фактором и определяет потребление реактивной мощности.

Задачами параграфа являются:

- проверка работы устройства компенсации в цепи трехфазного переменного тока;
- определение компенсации реактивной мощности на примере конкретного АД;
- проверка переходных процессов в цепи с устройством компенсации РМ полярными электролитическими конденсаторами.

Для определения емкости конденсаторов устройства, необходимо рассмотреть конкретный АД и собрать экспериментальную установку. Рассмотрим асинхронный электродвигатель наиболее часто встречающийся в сельскохозяйственном производстве, например серии АО2. Такие АД используются в работе различных технологических процессов (кормоприготовление, кормораздача, навозоуборка, вентиляция, насосы и т.п.). Также для эксперимента важно определить параметры АД на холостом ходу и под нагрузкой. Нагрузочное устройство в виде рабочего органа конкретного агрегата или генератора электрической энергии с изменяющимся характером загрузки в нашем случае является более подходящим для получения полной

информации о компенсации, чем привод насоса или вентилятора, где нагрузка на АД практически не изменяется.

Примем в виде нагрузочного устройства генератор электрической энергии, так как в лабораторных условиях имеются средства управления и контроля его параметров. В качестве генератора электрической энергии можно принять любую электрическую машину, например двигатель постоянного тока, который также работает в режиме генератора. Необходимо обеспечить возбуждение этого генератора. Загрузку генератора можно осуществить в виде мощного реостата, например водяного реостата.

Примем конкретное оборудование экспериментальной установки (таблица 3.2) и соберем электрическую схему (рисунок 3.3).

Рассчитаем емкость конденсаторов устройства компенсации РМ для принятого электродвигателя

Значение емкости конденсатора должно соответствовать потребляемой реактивной энергии из сети. Количество заряженных частиц или величина силы тока пропускаемой через конденсатор должно покрывать величину силы тока, потребляемого из сети, индуктивной нагрузки. В противном случае возникают потери в сети из-за недокомпенсации или перекомпенсации.

Таким образом, зная ток электродвигателя можно определить емкость конденсатора через его реактивную мощность [55]

$$Q = UI \sin \varphi, \quad (3.6)$$

где  $U$  – напряжение сети,  $B$ ;  $I$  – сила тока в цепи переменного напряжения,  $A$  (принимается номинальный ток АД);  $\varphi$  – угол сдвига фаз, *град*.

Выразим реактивную мощность через емкостное сопротивление

$$Q_C = U^2 \omega C \sin \varphi, \quad (3.7)$$

где  $\omega$  – круговая частота, *рад.*,  $\omega = 2\pi f$ , где  $f$  – значение промышленной частоты, *Гц*.

Тогда, чтобы покрыть потребление реактивной мощности индуктивной нагрузки, обусловленное отстающим по фазе током (3.6) необходимо создать потребление РМ емкостной нагрузки (3.7), обусловленной опережающим током

$$I \sin \varphi = U \omega C,$$

или

$$C = \frac{I \sin \varphi}{2\pi f U}.$$

Зная номинальный ток двигателя (из табл.3.3) и диапазон возможного угла  $\varphi$   $30^\circ \dots 80^\circ$  ( $30^\circ$  – в режиме нормальной работы ЭД,  $80^\circ$  – в момент пуска ЭД), можно определить максимальное значение емкости конденсаторов необходимых для компенсации РМ, потребляемой этим двигателем при  $\sin \varphi = 0,9$

$$C_{\max} = \frac{5,4 \cdot 0,9}{380 \cdot 314} = 41 \cdot 10^{-6} \Phi.$$

Конденсатор емкостью 46 мкФ способствует полной компенсации РМ. Это означает, что для АД с коэффициентом мощности 0,77 необходим конденсатор емкостью 46 мкФ, чтобы повысить коэффициент мощности до 1,0.

Примем конденсатор емкостью 33 мкФ, так как на 46 мкФ промышленностью не выпускаются. Подходящие близким значением емкости выпускаются номиналом 48 и 33 мкФ.

При выборе конденсатора помимо емкости, другие параметры (величины напряжения и тока пульсации) должны соответствовать его условиям эксплуатации по (3.2, 3.4, 3.5).

Амплитудное значение трехфазной сети составляет

$$U_{\text{сети}} = \sqrt{2} U_{\text{дейст.}}$$

$$U_{\text{сети}} = 1,41 \cdot 380 = 535,8 \text{ В.}$$

Однако напряжение на зажимах устройства компенсации полярными конденсаторами будет зависеть от схемы подключения «Y» - звезда или «Δ» - треугольник. В нашем случае подключение устройства рассматривается по схеме «звезда». Тогда амплитудное значение сети 311 В при действующем 220 В.

Окончательно примем для экспериментальной установки емкость конденсатора 33 мкФ [48] (таблица 3.9)

Таблица 3.9 - Элементы устройства компенсации РМ

Обозн.	Наименование элемента	Маркировка	Примечание
C1, C2, C3, C4, C5, C6	Полярный конденсатор	B43858 (K50-35) U 450 В, U <sub>AC</sub> 495 В, I <sub>AC</sub> 1,33А, Т 105°С, С 33 мкФ	
VD1, VD2,VD3,VD4,VD5,VD6	Выпрямительный диод	<b>1N5408 (DO-27)</b> U 1000В, I 3А, Т 150°С	-

Сравним параметры экспериментальной установки в режимах работы (таблица 3.10):

- на холостом ходу асинхронного двигателя без компенсации РМ;
- на холостом ходу АД с компенсацией РМ;
- под нагрузкой АД без компенсации РМ;
- под нагрузкой АД с компенсацией.

Таблица 3.10 - Результаты экспериментальных исследований

№ п/п	U <sub>действ.</sub> , В	U <sub>цели</sub> , В	I <sub>A</sub> , А	I <sub>B</sub> , А	I <sub>C</sub> , А	P, Вт	U <sub>ш</sub> , В	T <sub>конд.</sub> , °С
1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>Холостой ход при C = 0</b>								
1	300	423	2,25	2,27	2,25	250	-	-
2	330	466	2,51	2,53	2,51	170	-	-
3	360	507	3,0	3,1	3,0	190	-	-
4	380	535	3,32	3,33	3,32	210	-	-
5	400	564	3,70	3,71	3,70	260	-	-
6	420	592	4,25	4,26	4,25	320	-	-
<b>Холостой ход при C = 33 мкФ</b>								
7	300	423	1,61	1,63	1,61	200	-	18
8	330	466	1,80	1,81	1,80	180	-	19
9	360	507	2,0	2,02	2,0	210	-	19
10	380	535	2,10	2,11	2,10	260	-	19
11	400	564	2,40	2,41	2,40	300	-	20
12	420	592	3,10	3,11	3,10	360	-	20
<b>Под нагрузкой 70% от номинальной при C = 0</b>								
13	300	423	3,90	3,91	3,90	1500	222	-
1	2	3	4	5	6	7	8	9
14	330	466	3,80	3,81	3,80	1520	222	-
15	360	507	4,0	4,01	4,0	1520	222	-
16	380	535	4,10	4,11	4,10	1530	222	-

1	2	3	4	5	6	7	8	9
17	400	564	4,28	4,29	4,28	1540	222	-
18	420	592	4,65	4,66	4,65	1590	222	-
<b>Под нагрузкой 70% от номинальной при C = 33 мкФ</b>								
19	300	423	3,40	3,41	3,40	1550	222	20
20	330	466	3,40	3,41	3,40	1570	222	20
21	360	507	3,22	3,23	3,22	1580	222	20
22	380	535	3,33	3,34	3,33	1590	222	22
23	400	564	3,50	3,51	3,50	1610	222	24
24	420	592	3,70	3,71	3,70	1650	222	26
<b>Под нагрузкой 95% от номинальной при C = 0</b>								
25	360	507	4,90	4,91	4,90	2100	320	-
26	380	535	4,95	4,96	4,95	2105	320	-
27	400	564	5,01	5,02	5,01	2110	320	-
30	420	592	5,40	5,41	5,40	2120	320	-
<b>Под нагрузкой 95% от номинальной при C = 33 мкФ</b>								
31	360	507	4,11	4,12	4,11	2100	320	30
32	380	535	4,13	4,14	4,13	2105	320	33
33	400	564	4,15	4,16	4,15	2110	320	36
34	420	592	4,25	4,26	4,25	2150	320	37

Анализ полученных результатов показывает, что параллельное включение устройства компенсации РМ на полярных электролитических конденсаторах снижает величину тока цепи, что влияет на потребление мощности. Для наглядности представим графическое изображение параметров (рисунки 3.12, 3.13, 3.14).

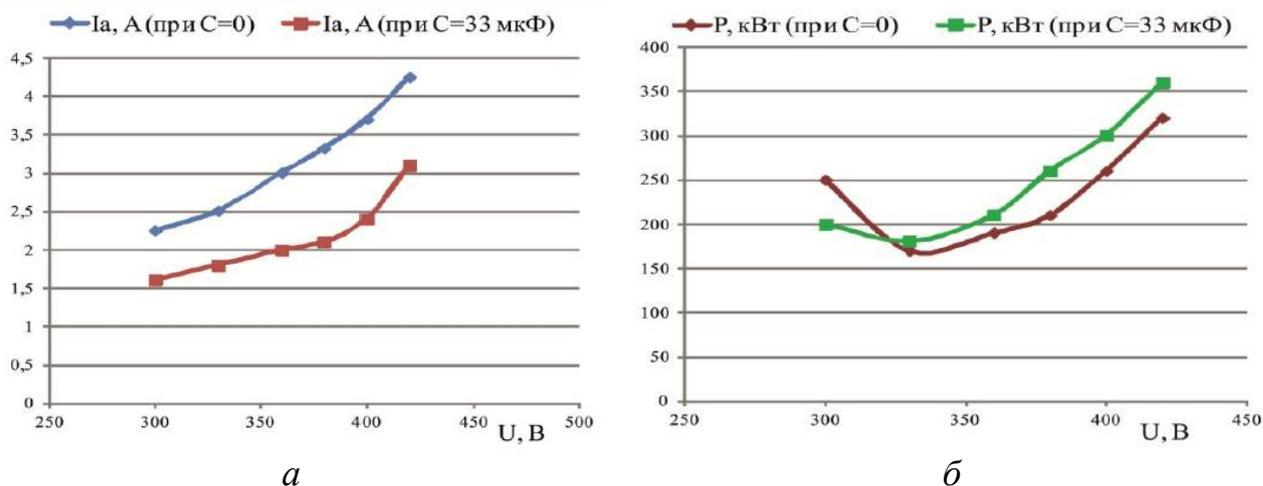
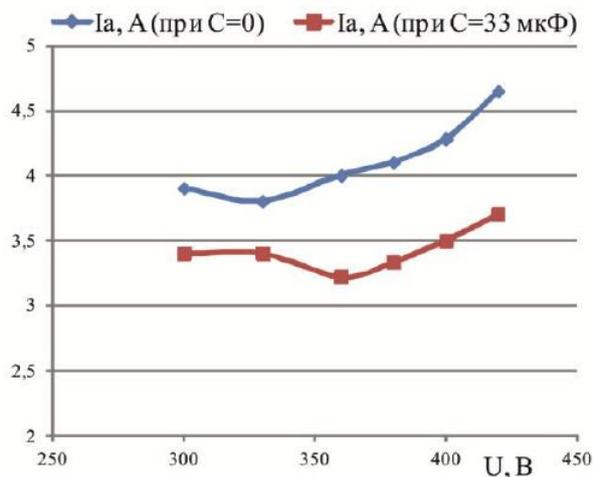
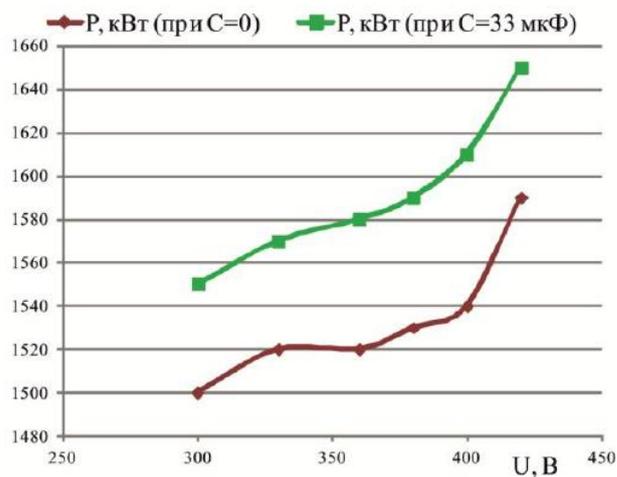


Рисунок 3.12 - Зависимость тока и мощности от напряжения на холостом ходу

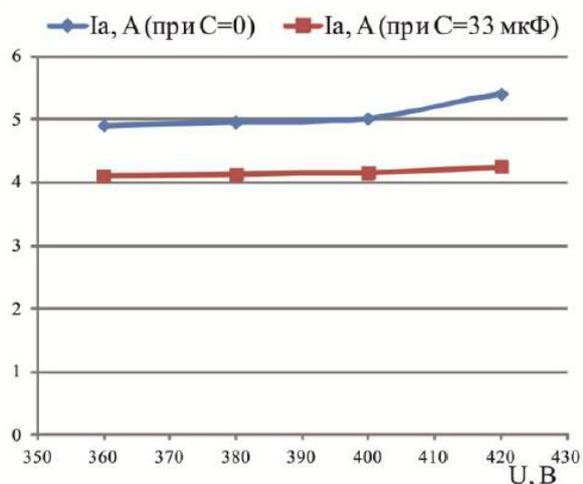


а

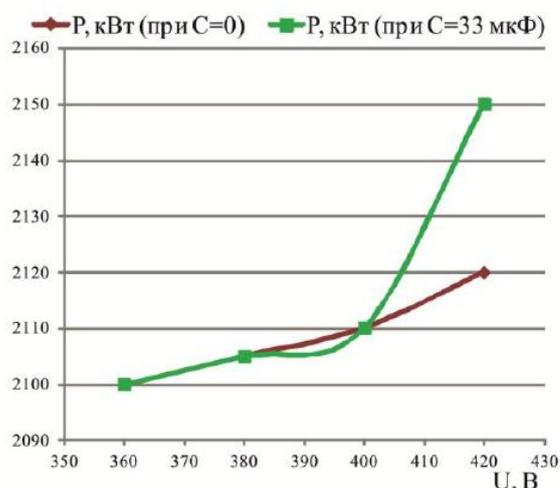


б

Рисунок 3.13 - Зависимость тока и мощности от напряжения при нагрузке АД 70 %



а



б

Рисунок 3.14 - Зависимость тока и мощности от напряжения при нагрузке АД 95 %

По результатам измерений видно, как влияет подключение устройства компенсации РМ. Проверим форму синусоиды тока, протекающего через конденсатор, с помощью осциллографа в соответствии со схемой, представленной на рисунке 3.15.

Таким образом, судя по результатам эксперимента, форма тока опережает форму напряжения по фазе. Это означает, что в цепи протекает емкостной ток, который компенсирует действие индуктивного тока. Рассчитаем  $\cos\varphi$  по выражению

$$\cos\varphi = \frac{P}{\sqrt{3}UI}, \quad (3.8)$$

где  $P$  – трехфазная активная мощность, Вт;  $U$  – линейное действующее напряжение сети, В;  $I$  – линейное значение полного тока цепи, А.

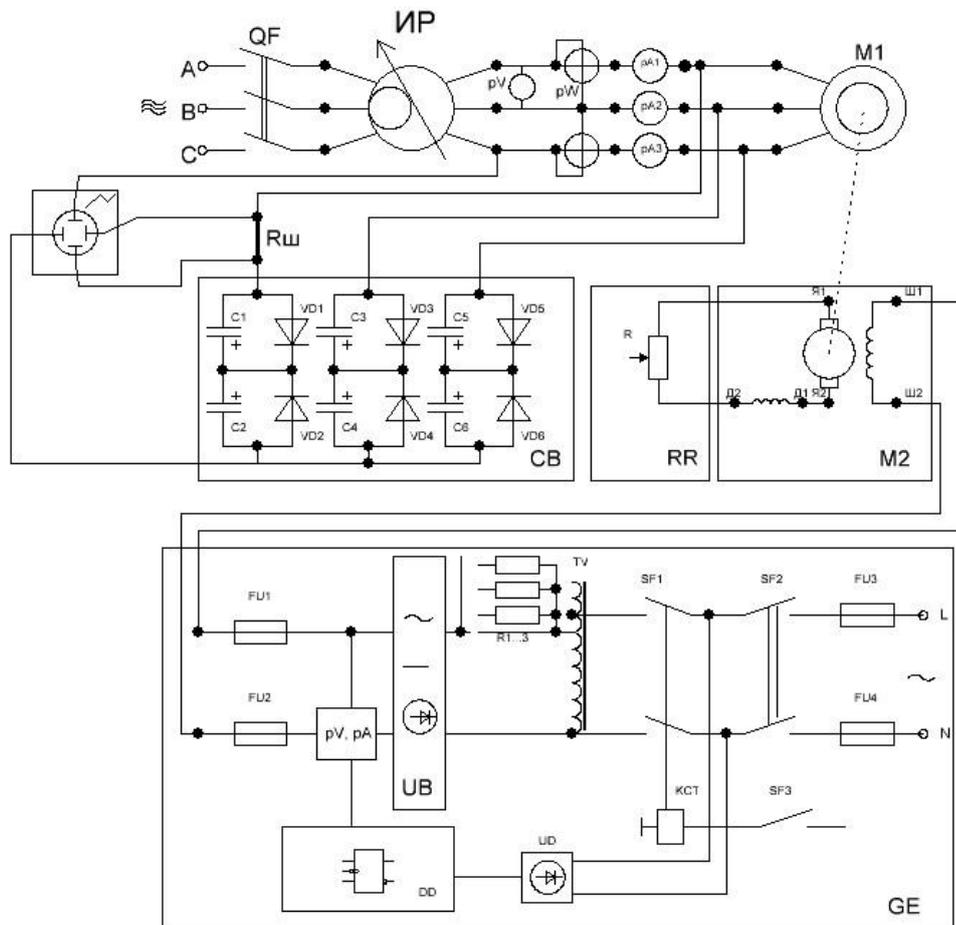


Рисунок 3.15 - Схема экспериментальной установки с осциллографом  
 $R_{ш}$  – шунт (никель 75ШИП  $R = 7500$  мкОм)

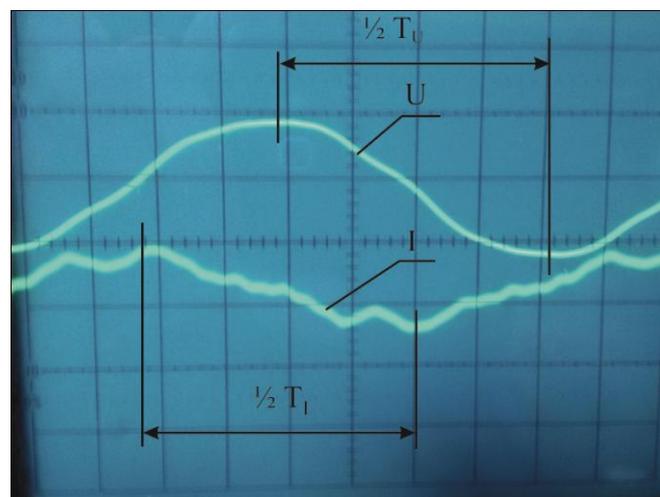


Рисунок 3.16 - Формы синусоид напряжения  $U$  и тока  $I$  ( $T$  – период синусоиды)

Зависимость  $\cos\varphi$  от напряжения и применения устройства компенсации РМ, а также векторную диаграмму тока (на примере фазы А) покажем на рисунках 3.17 и 3.18.

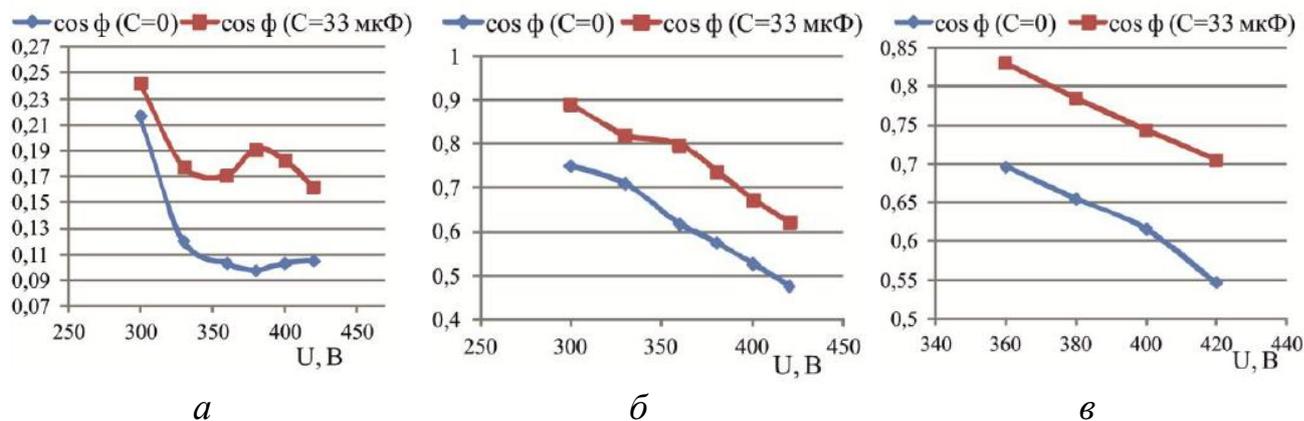


Рисунок 3.17 - Изменение коэффициента мощности ( $\cos\varphi$ ) с использованием устройства компенсации РМ: а) на холостом ходу; б) при нагрузке  $\beta = 70\%$ ; в) при нагрузке  $\beta = 95\%$

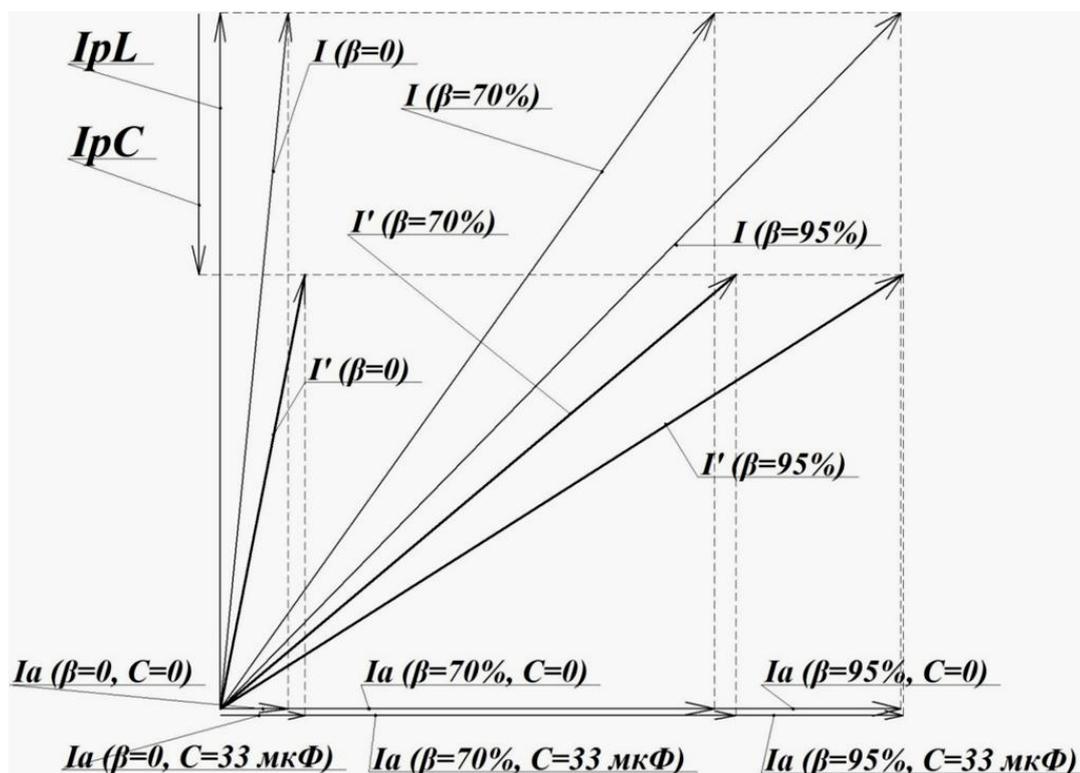


Рисунок 3.18 - Вектор полного тока без компенсации  $I$  и с компенсацией  $I'$  ( $I_a$  – активный ток,  $I_pL$  – индуктивный реактивный ток,  $I_pC$  – емкостный реактивный ток)

Анализируя рисунок 3.18, видно что, использование устройства компенсации реактивной мощности дает эффект в виде повышения

коэффициента мощности. Это происходит потому что, емкостной ток, опережающий по фазе напряжение, компенсирует индуктивный ток, отстающий по фазе от напряжения (рис. 3.16, 3.17). Тем самым вектор суммарного или полного тока в цепи стремится сократить угол между ним и вектором активного тока. Изменение угла между векторами токов прямопропорционально изменению угла между векторами полной и активной мощности.

Таким образом, по результатам экспериментального исследования, установлено, что использование устройства компенсации РМ на полярных электролитических конденсаторах возможно использовать в цепях трехфазного переменного тока, который принимает синусоиду формы емкостного тока опережающей форму напряжения, а также способствует повышению  $\cos\varphi$ .

### 3.5 Выводы по главе

1. Установлено, что устройство компенсации реактивной мощности на полярных электролитических конденсаторах, возможно, использовать в цепи переменного тока, в соответствии с рисунком 3.1.

2. В результате анализа полученных данных эксперимента установлено, что в момент пуска асинхронных двигателей возникает значительное потребление реактивного тока, что неблагоприятно влияет на показатели сети, который можно компенсировать с помощью динамической компенсации на полярных конденсаторах.

3. Габаритные размеры устройства компенсации РМ на полярных электролитических конденсаторах соизмеримы 1:1 с габаритными размерами контактной клеммной коробки АД.

## 4. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Целью анализа результатов эксперимента является установление условий, схем и режимов эксплуатации устройства компенсации реактивной мощности полярными конденсаторами в цепи переменного синусоидального тока, а также проверка повышения коэффициента мощности.

### 4.1 Статистическая обработка результатов повышения коэффициента мощности

Сбор, первичная обработка и анализ полученных материалов эксперимента требует проверки и расчета ее статистических характеристик и достоверности данных.

Расчет статистических показателей сводится к определению и анализу относительное значения, среднего значения, дисперсии, среднему квадратическому отклонению и средней квадратической ошибке полученного коэффициента мощности ( $\cos \varphi$ ).

Таблица 4.1 - Данные расчета коэффициента мощности (о.е.)

U <sub>действ.</sub> , В	Холостой ход АД		Нагрузка АД 70 %		Нагрузка АД 95%	
	cos φ при C=0	cos φ при C=33 мкФ	cos φ при C=0	cos φ при C=33 мкФ	cos φ при C=0	cos φ при C=33 мкФ
1	2	3	4	5	6	7
300	0,217	0,242	0,745	0,888	-	-
330	0,120	0,177	0,709	0,818	-	-
360	0,103	0,171	0,617	0,797	0,696	0,830
380	0,097	0,191	0,574	0,735	0,654	0,784
400	0,103	0,183	0,526	0,673	0,616	0,743
420	0,105	0,162	0,476	0,621	0,547	0,704

Определим средние значения коэффициентов мощности на измеримом интервале действующего напряжения

$$\overline{\cos \varphi} = \frac{\sum \cos \varphi_i}{n} \quad (4.1)$$

где  $n$  – количество опытов, шт.

Сведем данные средних значений в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 - Средние значения коэффициента мощности

Холостой ход АД		Нагрузка АД 70 %		Нагрузка АД 95%	
$\cos \varphi$ при C=0	$\cos \varphi$ при C=33 мкФ	$\cos \varphi$ при C=0	$\cos \varphi$ при C=33 мкФ	$\cos \varphi$ при C=0	$\cos \varphi$ при C=33 мкФ
0,124	0,187	0,609	0,755	0,628	0,766

Для оценки степени разброса (отклонения) коэффициента мощности от его среднего значения, наряду с максимальным и минимальным значениями, рассчитаем дисперсию и среднее квадратичное отклонение.

Дисперсия определяется по выражению

$$\sigma^2 = \frac{\sum(\overline{\cos \varphi} - \cos \varphi_i)^2}{n-1}. \quad (4.2)$$

Таблица 4.3 - Дисперсии коэффициента мощности

Холостой ход АД		Нагрузка АД 70 %		Нагрузка АД 95%	
$\cos \varphi$ при C=0	$\cos \varphi$ при C=33 мкФ	$\cos \varphi$ при C=0	$\cos \varphi$ при C=33 мкФ	$\cos \varphi$ при C=0	$\cos \varphi$ при C=33 мкФ
0,002113	0,000815	0,011119	0,009766	0,00404	0,002915

Среднее квадратическое отклонение (экспериментальное отклонение) коэффициента мощности определяется по выражению

$$\sigma_{\varphi} = \sqrt{\sigma^2}. \quad (4.3)$$

В целом судить о повышении коэффициента мощности за счет применения устройства компенсации РМ на полярных электролитических конденсаторах на основе полученных результатов эксперимента допускается при учете средней квадратической ошибке

$$\sigma_{cp} = \sqrt{\frac{\sum(\overline{\cos \varphi} - \cos \varphi_i)^2}{n(n-1)}}. \quad (4.4)$$

Таблица 4.4 - Средняя квадратическая ошибка коэффициента мощности

Холостой ход АД		Нагрузка АД 70 %		Нагрузка АД 95%	
$\cos \varphi$ при C=0	$\cos \varphi$ при C=33 мкФ	$\cos \varphi$ при C=0	$\cos \varphi$ при C=33 мкФ	$\cos \varphi$ при C=0	$\cos \varphi$ при C=33 мкФ
0,018766	0,011658	0,043048	0,040344	0,025947	0,022041

Любая физическая величина носит вероятностный характер. На основе математической статистики определим достоверность полученных результатов повышения коэффициента мощности с вероятностью 95% [90,96]. Воспользуемся методом Стьюдента [90,96]. На основе количества опытов и вероятности появления того же значения коэффициента мощности при тех же условиях определим коэффициент Стьюдента [90,96]

$$\alpha = 2,57.$$

Тогда доверительный интервал

$$\Delta \cos \varphi_{\text{дов.}} = \pm \alpha \sigma_{\text{ср.}} \quad (4.5)$$

Изменение всей совокупности экспериментального исследования изменения коэффициента мощности определяется как

$$\cos \varphi = \overline{\cos \varphi} \pm \alpha \sigma. \quad (4.6)$$

Таблица 4.5 - Доверительный интервал коэффициента мощности

Холостой ход АД		Нагрузка АД 70 %		Нагрузка АД 95%	
$\cos \varphi$ при C=0	$\cos \varphi$ при C=33 мкФ	$\cos \varphi$ при C=0	$\cos \varphi$ при C=33 мкФ	$\cos \varphi$ при C=0	$\cos \varphi$ при C=33 мкФ
0,0758...0,172	0,1575...0,217	0,4980...0,719	0,6516...0,859	0,5615...0,694	0,7088...0,822
2	4	3	0	9	1

Аналогичным образом рассчитаем повышение коэффициента мощности при  $U_{\text{действ.}} \pm 10\%$  напряжения и занесем в таблицу 4.6.

Таблица 4.6 - Математическая статистика и достоверность повышения коэффициента мощности при нагрузке

Наименование	Показатель	Значение
Среднее повышение коэффициента мощности	$\overline{\Delta \cos \varphi}$	0,1475
Среднее квадратическое отклонение	$\sigma_3$	0,017799
Ошибка эксперимента	$\sigma_{\text{ср}}$	0,006293
Размер доверительного интервала (P=0,95)	$\alpha$ (при вероятности 95%)	2,36
Доверительный интервал	$\Delta \cos \varphi$	0,1327...0,1624

Таким образом, с оценкой доверительного интервала 2,13 [96] вероятностью 95% и средней квадратической ошибкой 0,006 установлено повышение коэффициента мощности на 0,133...0,163 единиц или на 19...24 %.

## 4.2 Проверка теоретических и экспериментальных данных

Расчет повышения коэффициента мощности при известных данных емкости конденсаторов, напряжения сети и других данных сводится к определению результирующего угла  $\varphi_2$  через тангенс по выражению

$$Q = P(\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2), \quad (4.7)$$

где  $Q$  – реактивная мощность УКПК, *Var*;  $P$  – активная мощность нагрузки, *Вт*;  $\operatorname{tg}\varphi_1$  – тангенс угла между полной и активной мощностью до компенсации;  $\operatorname{tg}\varphi_2$  – тангенс угла между полной и активной мощностью после компенсации.

После преобразования

$$\operatorname{tg}\varphi_2 = \operatorname{tg}\varphi_1 - \frac{U^2 \omega C}{P}, \quad (4.8)$$

где  $U$  – действующее напряжение на зажимах УКПК, *В*;  $C$  – емкость конденсатора УКПК, *Ф*;  $\omega$  – угловая частота, *рад/с*.

Величина  $\operatorname{tg}\varphi_1$  обусловлена начальным потреблением реактивной мощности электроприемника, то есть до компенсации (электродвигателя, п. 3.4). Определим повышение коэффициента мощности –  $\cos \varphi$ , через тангенс угла и сведем данные расчетов в таблицу 4.7.

Сравним полученные данные экспериментального исследования и теоретического расчета повышения коэффициента мощности.

Таблица 4.7 - Сравнение экспериментальных и теоретических данных

Напряжение сети, В	Экспериментальные данные $\cos \varphi$	Теоретический расчет $\cos \varphi$
360	0,830	0,779
380	0,784	0,757
400	0,743	0,734
420	0,704	0,689

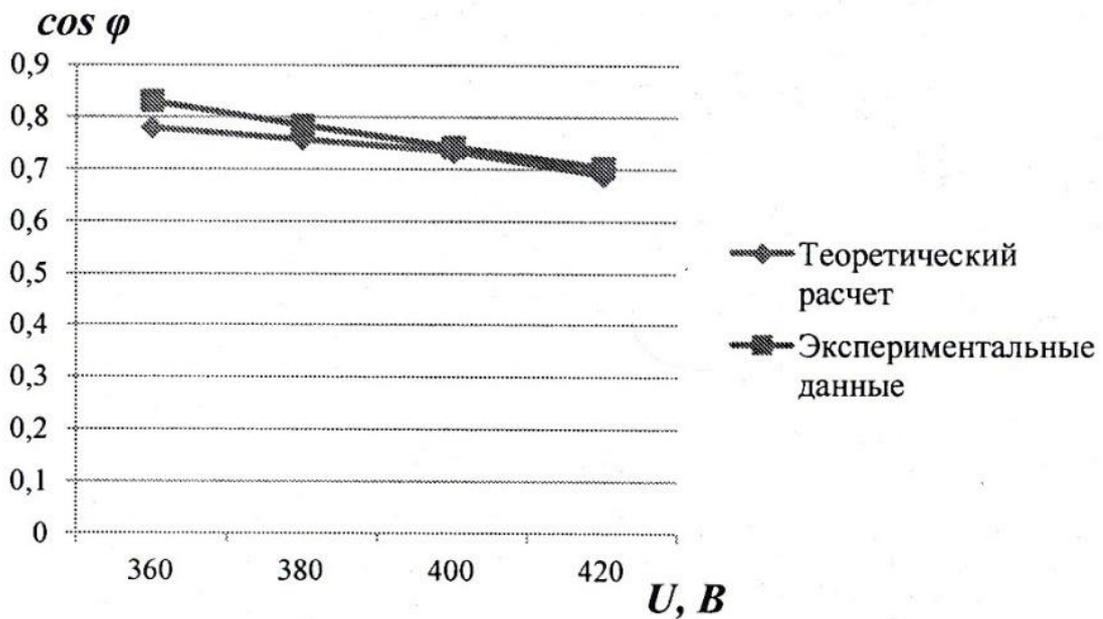


Рисунок 4.1 - Сравнение теоретических и экспериментальных данных

Отклонение теоретического расчета и экспериментальных данных 1,2...3,8%.

### 4.3 Нагревостойкость полярных конденсаторов

Полярные конденсаторы типа В43858, как отмечалось, имеют малые габариты. Они хорошо приспособляются для использования при компенсации реактивной мощности в асинхронных двигателях до 10 кВт. Именно такие двигатели имеют самое широкое применение в сельскохозяйственных предприятиях. Известно, что в общем числе электродвигателей основная доля (до 75 %) приходится на двигатели мощностью до 5 кВт. Это как раз двигатели с низким коэффициентом мощности.

Однако малые габариты конденсаторов имеют и нежелательные последствия, которые состоят в том, что такие симиерты имеют малую постоянную времени нагрева. По опытным данным для конденсаторов емкостью 22 мкФ и напряжением 450 В постоянная времени нагрева составляет

10 мин. Чтобы учесть эти особенности отдельно изучена нагревостойкость этих конденсаторов.

Для этого использована схема на рисунке 4.2. В ней дополнительно предусмотрены измерения тока в конденсаторе, напряжения на зажимах конденсатора (переменного и постоянного), времени проведения опытов.

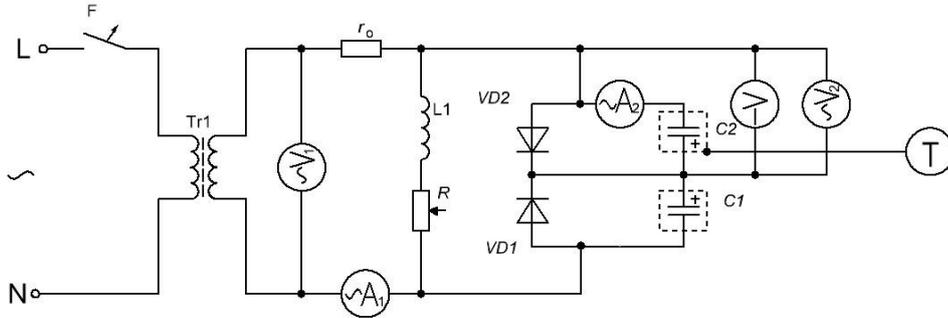


Рисунок 4.2 – Схема исследования полярного конденсатора на нагревостойкость (описание в таблице 4.8)

Таблица 4.8 – Описание элементов схемы исследования конденсаторов на нагревостойкость

Обоз.	Наименование	Маркировка параметры	Примечание
1	2	3	4
$F$	Автоматический выключатель	ВА47-29 1П С2 $U 230/400 В, I_{ср} 20А$	
$R, L$	Регулируемое сопротивление	BC1-500W, $U 0...500 В, R 0...1500 Ом, W 500 Вт$	
$r_0$	Внутреннее сопротивление цепи	-	Омическое сопротивление проводника, не более 0,001 Ом (медь, $L = 2 м$ )
$\sim A_1$	Амперметр	Мультиметр Victor VC97 $0...10 А, кл. 1,5$	
$\sim V_1$	Вольтметр	Мультиметр Multimetr GDM-354A $0...1000 В, кл. 1,5$	
$\sim A_2$	Амперметр	Мультиметр Multimetr GDM-354A $0...10 А, кл. 1,5$	
$\sim V_2$	Вольтметр	Мультиметр Multimetr GDM-354A $0...1000 В, кл. 1,5$	
$-V_2$	Вольтметр	Мультиметр Multimetr GDM-354A $0...1000 В, кл. 1,5$	

1	2	3	4
<i>Tr1</i>	Латр	УЛ 220-500	
<i>T</i>	Мультиметр с термопарой	МУ-64, temp °С - 20...+1000 (К)	
<i>C1, C2</i>	Полярный конденсатор №1 и №2	В43858 (К50-35) <i>U</i> 450 В, <i>U</i> <sub>АС</sub> 500 В, <i>I</i> <sub>АС</sub> 1,02 А, <i>T</i> 105°С, <i>C</i> 22 мкФ	
<i>VD1, VD2</i>	Выпрямительный диод №1 и №2	<b>1N5408 (DO-27)</b> <i>U</i> 1000 В, <i>I</i> 3А, <i>T</i> 150°С	
<i>t</i>	Секундомер	-	Секундомер телефона Nokia C2

Экспериментальное изучение выполнялось при изменении напряжения от 100 до 230 В, тока от 0,1 до 1,0 А. Продолжительность каждого опыта варьировалась от 5 до 15 мин. Результаты представлены в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Результаты исследования полярных конденсаторов на нагревостойкость

№ опыта	Параметры цепи ( <i>A</i> <sub>1</sub> , <i>V</i> <sub>1</sub> )			Параметры конденсатора ( <i>A</i> <sub>2</sub> , <i>V</i> <sub>2</sub> , <i>V</i> , <i>T</i> )				Продолжительность опыта <i>t</i> , мин
	<i>R</i> , Ом	<i>I</i> , А	<i>U</i> , В	<i>I</i> , А	<i>U</i> , В	<i>U</i> , В	<i>T</i> , °С	
1	300	0,65	100	0,49	85	185	25	8
2	300	0,95	145	0,73	100	212	42	12
3	300	1,22	201	0,88	135	288	80	15
4	300	1,27	220	1,02	157	321	102	5
перерыв								18
5	600	0,49	99	0,47	87	180	30	5
6	600	0,75	147	0,71	102	213	44	7
7	600	0,91	200	0,86	136	293	83	11
8	600	1,14	222	1,04	157	334	105	6
перерыв								22
9	800	0,50	97	0,48	86	192	30	7
10	800	0,76	145	0,74	103	220	45	7
11	800	0,92	199	0,88	137	289	79	8
12	800	1,10	221	1,05	154	321	104	7
перерыв								21
13	1000	0,51	100	0,50	82	190	32	8
14	1000	0,75	148	0,73	101	214	48	7
15	1000	0,92	200	0,89	137	289	90	7
16	1000	1,09	221	1,04	159	311	110	9

Проведя анализ полученных данных, можно сделать вывод о том, что полярные электролитические конденсаторы емкостью 22 мкФ имеют

значительную мощность порядка  $300 \text{ Ватт}$  при малых габаритах объемом  $5,0 \text{ см}^3$ .

Однако, как видно из результатов эксперимента, эти конденсаторы скоротечно нагреваются в зависимости от времени использования (рис. 4.3) и напряжения, приложенного к зажимам конденсатора (рис. 4.4).

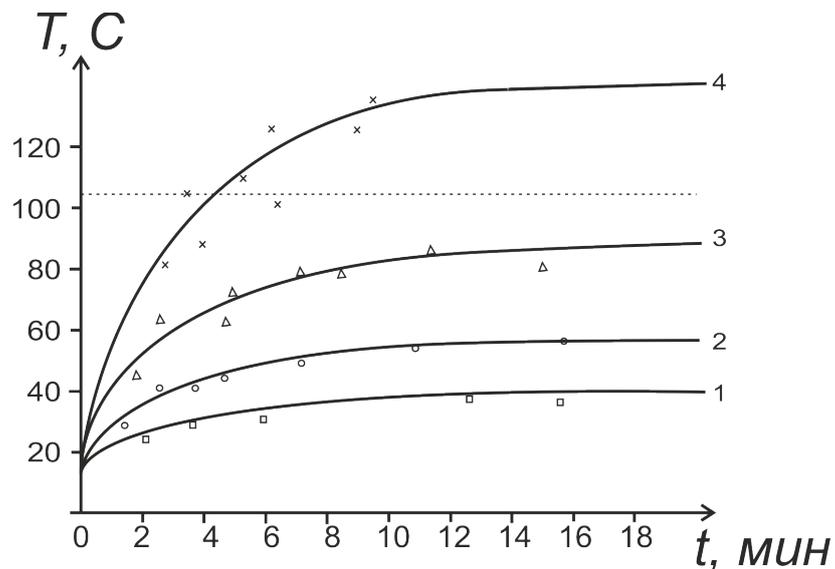


Рисунок 4.3 – Зависимость температуры конденсатора от продолжительности его работы (1 – напряжение на зажимах УКПК 100 В; 2 – 150 В; 3 – 200 В; 4 – 220 В)

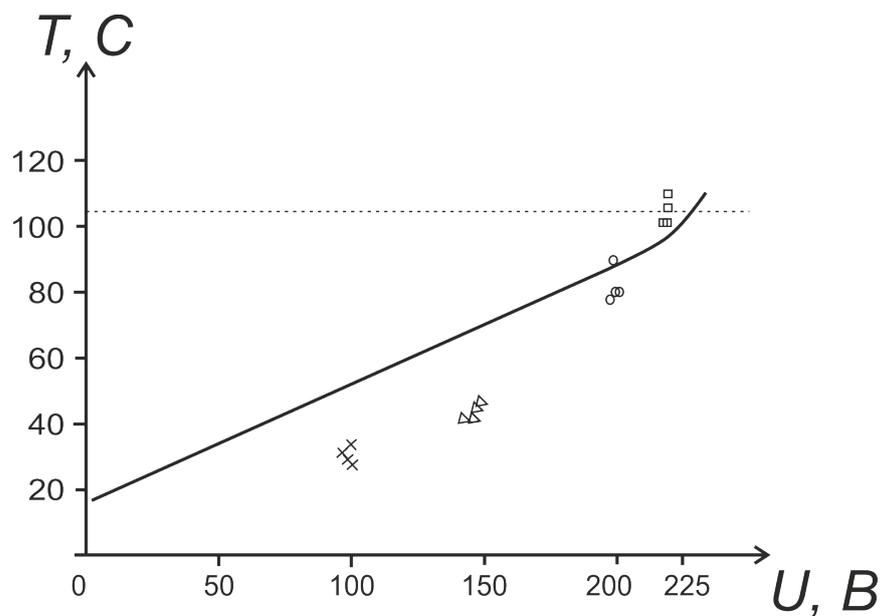


Рисунок 4.4 – Зависимость температуры конденсатора от приложенного напряжения

Анализ данных зависимостей показал, что полярные конденсаторы имеют малую постоянную времени нагрева, которая в среднем составляет порядка 9...11 мин. Такая особенность проявляется у конденсаторов с электролитической изолирующей поверхностью. Вместе с этим этот электролит и особенности обработки обкладок дают высокую диэлектрическую проницаемость, благодаря чему эти конденсаторы имеют сравнительно большую емкость при их малых габаритах  $4...8 \text{ мкФ/см}^3$ .

Таким образом, при выборе полярных электролитических конденсаторов необходимо учитывать нагревостойкость, которая прямолинейно зависит от напряжения на зажимах конденсатора. Номинальное напряжение конденсатора должно быть выше амплитудного значения сети, если электродвигатель с устройством компенсации включен в работу на время меньшее постоянной времени нагрева. Если же электродвигатель работает больше этого времени, то необходимо принимать конденсатор с двойным запасом по напряжению относительно амплитудного значения напряжения сети.

#### **4.4 Режимы использования полярных конденсаторов**

В сельскохозяйственных электроустановках применяют разнообразные по мощности и частоте вращения асинхронные двигатели. Они существенно отличаются друг от друга по продолжительности и характеру нагрузки. Принята следующая классификация режимов работы электродвигателей [72, 76]:

- продолжительный режим (режим  $S1$ ) работы: неизменная нагрузка продолжается столько времени, что превышение температуры всех частей электродвигателя достигает практически установившегося значения. Это режимы работы приводов вентиляторов, насосов, транспортеров;

- кратковременный режим (режим  $S2$ ) работы: период работы чередуется с периодом паузы, причем за рабочий период температура электродвигателя не успевает достигнуть установившегося значения, а в период паузы остывает до окружающей температуры. Это режимы работы приводов задвижек, щитов

(оронительных систем) кранов, навозоуборочных транспортеров, переключателей;

- повторно-кратковременный режим (режим  $S3$ ) работы: в рабочий период температура двигателя не достигает установившегося значения, а в период паузы не остывает до окружающей температуры. Это режимы работы различных долбежных станков, прессов, молотов, автоматизированных приспособлений, дозаторы, погрузчики, лебедки и т.п. Продолжительность включений (ПВ) составляет 15, 25, 40, 60 % от цикла, который принимают 10 мин.

$$\text{ПВ} = \frac{t_p}{t_p + t_n} 100\%, \quad (4.9)$$

где  $t_p, t_n$  – продолжительность работы и паузы, ч.

Повторно-кратковременный режим неблагоприятный режим с позиции потребления реактивной мощности. Дело в том, что в пусковых режимах результирующий коэффициент мощности значительно меньше, чем номинальный коэффициент мощности. Поэтому потребление реактивной мощности значительно больше, чем при продолжительном режиме для одного и того же асинхронного двигателя;

- повторно-кратковременный режим работы с влиянием пусковых процессов (режим  $S4$ ): работа электродвигателя осуществляется в режиме  $S3$ , каждый цикл которого осуществляется с длительным пуском, чтобы сохранить одновременность нарастания температуры элементов двигателя;

- повторно-кратковременный режим работы с влиянием пусковых процессов и электрическим торможением (режим  $S5$ ): режим  $S4$  с добавлением быстрого электрического торможения каждого цикла;

- перемежающийся режим (режим  $S6$ ) работы: выполнение работы электродвигателя осуществляется циклами, в каждый из которых включает в себя время работы с постоянной неизменной нагрузкой и время работы на холостом ходу;

- периодический перемежающийся режим с влиянием пусковых процессов и электрическим торможением (режим  $S7$ ): в данном режиме работы

нет пауз, то есть  $PВ = 100\%$ . При выполнении цикла, который включает достаточно долгий пуск, номинальный режим работы и быстрое электрическое торможение, негативные последствия для сети процесс торможения сравнивают с тремя пусками.

- периодический перемежающийся режим с периодически изменяющейся частотой вращения двигателя (режим  $S8$ ): в цикл работы электродвигателя входит время пуска, время работы с неизменной нагрузкой на одной частоте вращения, быстрое электрическое торможение, время работы с неизменной нагрузкой на другой частоте вращения.

В сельскохозяйственном производстве широкое применение имеют режимы  $S1$  и  $S3$ . Остальные режимы встречаются редко, поскольку используются только для частных случаев или в составе отдельных сложных установок.

В продолжительном режиме  $S1$  использование УКПК возможно с учетом нескольких условий, которые получены по вышеизложенным результатам исследования нагревостойкости, то есть

$$U_{C \text{ УКПК}} > 2U_{\text{max. н.эд}}, \quad (4.10)$$

где  $U_{C \text{ УКПК}}$  – номинальное напряжение полярных конденсаторов в устройстве УКПК,  $B$ ;  $U_{\text{max. н.эд}}$  – амплитудное значение напряжения питания электродвигателя,  $B$ .

Например, питание трехфазного асинхронного двигателя мощностью  $2,2 \text{ кВт}$  осуществляется от сети напряжением  $380 \text{ В}$  по схеме «звезда». УКПК подключается, как обосновано в п. 2.5., также по схеме «звезда». Тогда действующее напряжение на зажимах конденсатора составляет  $220 \text{ В}$ , а амплитудное  $311 \text{ В}$ . В этом случае для режима  $S1$  номинальное напряжение на зажимах конденсатора в УКПК должно быть более  $622 \text{ В}$  (рис. 4.5). Такое номинальное напряжение конденсаторов можно добиться путем соединения двух конденсаторов последовательно.

В этом случае емкость конденсаторов определяется по установившейся реактивной мощности, потребляемой электродвигателем из сети  $Q_{эд}$

$$Q_{эд} = Q_{\text{УКПК}},$$

где  $Q_{УКПК}$  - реактивная мощность батареи конденсаторов, *Var*.

При последовательном соединении конденсаторов, емкость и количество конденсаторов определяется по емкости конденсаторной батареи.

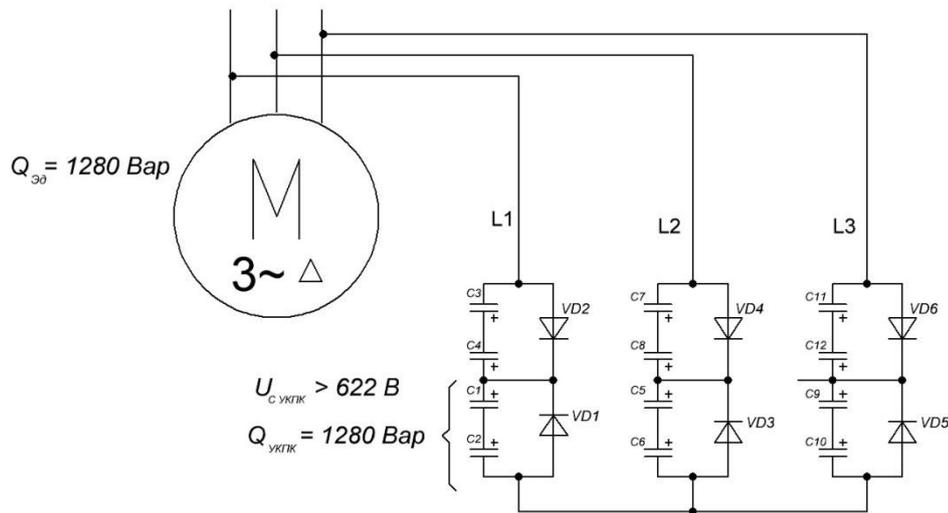


Рисунок 4.5 – Пример подключения УКПК в соответствии с режимом работы электродвигателя S1 (C1, C2, ..., C12 – полярные электролитические конденсаторы; VD1, VD2, ..., VD6 – полупроводниковые диоды, M – асинхронный электродвигатель)

С учетом исходных данных примера, необходимо выбрать конденсатор на номинальное напряжение не ниже 350 В, емкостью 22 мкФ.

В данном случае для режима S1 УКПК будет удовлетворять условиям по нагревостойкости и компенсации реактивной мощности.

В повторно-кратковременном режиме S3 условия работы УКПК будут несколько другими. Это связано с тем, что время работы электродвигателей в цикле до 10 мин будет значительно ниже постоянной времени нагрева полярных конденсаторов. Тогда напряжение конденсаторов

$$U_{C \text{ УКПК}} > U_{\text{max. н.эд.}}$$

Однако в режиме S3 значительную часть времени занимает пуск электродвигателя (динамический режим), при котором потребление реактивной мощности в десятки раз больше чем в установившемся режиме. Поэтому УКПК необходимо рассчитывать с некоторым запасом по мощности, что облегчит пуск двигателя, то есть

$$Q_{эд} < Q_{УКПК}.$$

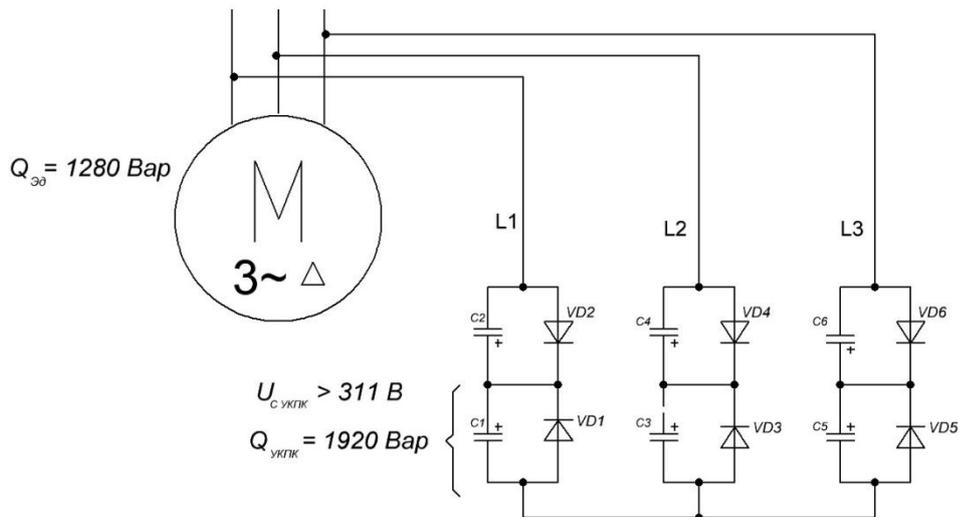


Рисунок 4.6 – Пример подключения УКПК в соответствии с режимом работы электродвигателя S3

С учетом исходных данных примера, необходимо выбрать конденсатор на номинальное напряжение не ниже  $350\text{ В}$ , емкостью  $63\text{ мкФ}$ .

#### 4.5 Результаты динамической компенсации реактивной энергии при пуске асинхронного двигателя.

Как отмечалось ранее, в момент пуска АД происходит значительное потребление реактивного тока. Пусковой ток возникает при начале вращения двигателя и продолжается до достижения номинальной скорости вращения двигателя. Рассмотрим и опишем параметры АД в момент пуска без устройства компенсации и с устройством компенсации от различных источников питания АД: от сети и дизельных электростанции (ДЭС) в качестве которых выступает резервные электростанции.

Если от ДЭС запитан асинхронный двигатель сопоставимой номинальной мощности, то запуститься он не сможет. И чтобы этот двигатель запустился, ДЭС должна его превышать по номинальной мощности в  $K_{\text{пуск}}/K_{\text{пер.ДЭС}}$  раз ( $K_{\text{пуск}}$  – коэффициент пускового тока двигателя,  $K_{\text{пер.ДЭС}}$  – коэффициент перегрузки ДЭС). Допустим,  $K_{\text{пуск}}=8$ , а  $K_{\text{пер.ДЭС}}=1,1$ , тогда номинальная мощность ДЭС должна быть в  $8/1,1=7,3$  раза больше, чем номинальная мощность асинхронного

двигателя. При этом загрузка ДЭС при запущенном двигателе составит всего  $100\%/7,3=13,7\%$ . Между тем, фирмы-изготовители ДЭС регламентируют минимальную загрузку не менее 25...40%.

Необходимо найти способ снизить пусковой ток и тем самым решить проблему снижения установленной мощности ДЭС.

Можно применить на выходе ДЭС преобразователь частоты и производить частотный пуск АД, но тогда мы не сможем подключить других потребителей или на все АД, которые есть в системе поставить преобразователи частоты и устройства плавного пуска, но это экономически не целесообразно.

Однако, есть способ позволяющий уменьшить токовые нагрузки на ДЭС при пуске АД.

Анализ пусковых токов АД показал, что основу пускового тока составляет реактивный ток. Поэтому необходимо компенсировать эту реактивную составляющую с помощью динамической компенсации и тем самым снизив токовую нагрузку ДЭС.

На рисунках 4.7-4.9 представлены результаты компьютерного моделирования работы разработанного устройства в программе MATLAB-SIMULINK питания двигателя от сети до компенсации и после компенсации реактивного тока.

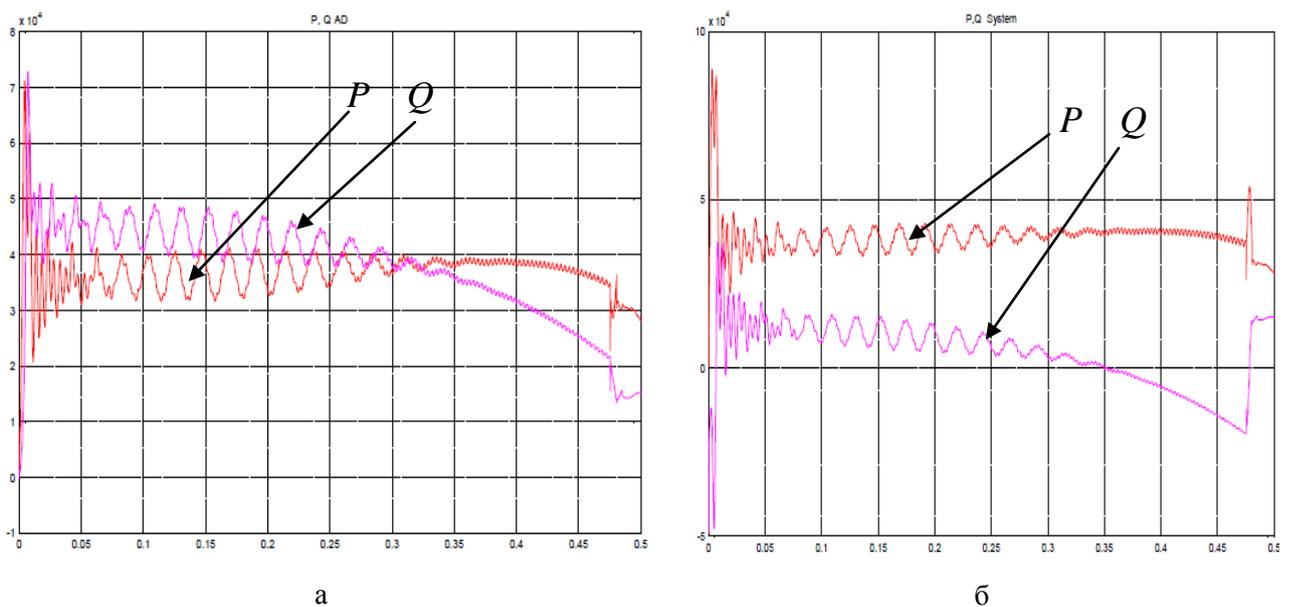


Рисунок 4.7 – Графики активных  $P$  и реактивных  $Q$  мощностей  
а) без компенсации; б) с компенсацией

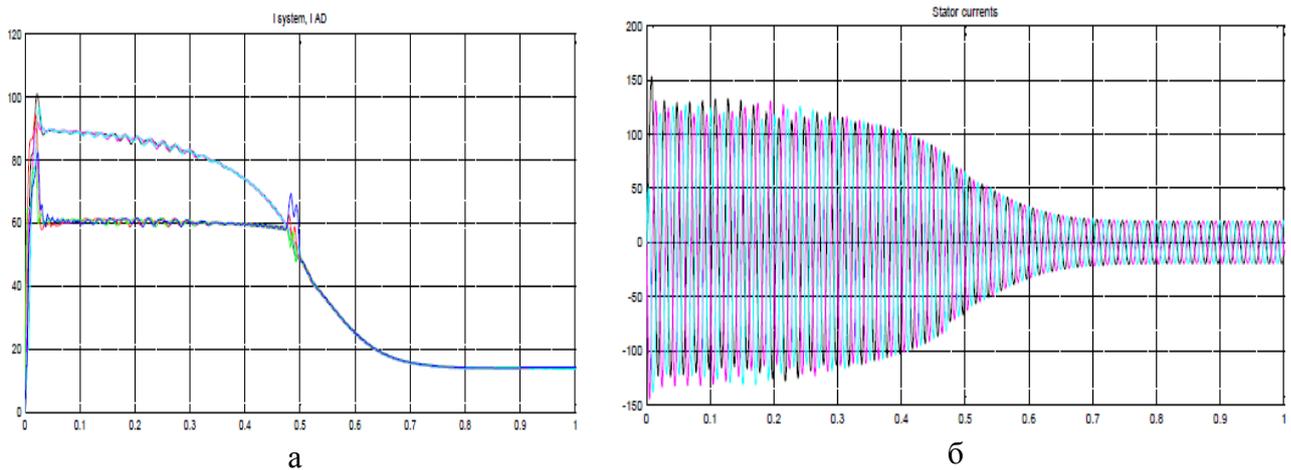


Рисунок 4.8 – Графики токов  
 а) сети; б) токов АД

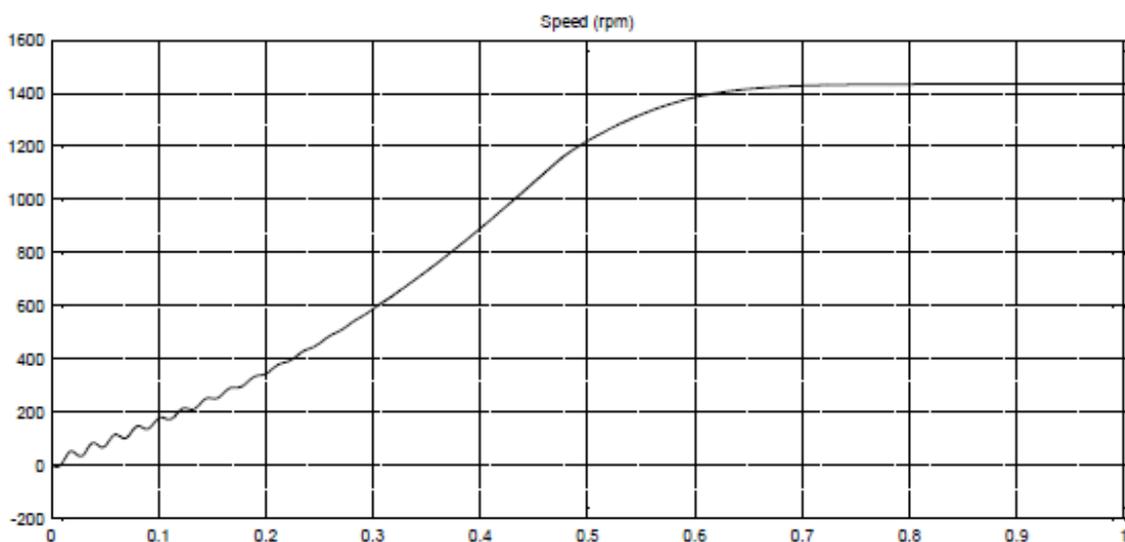


Рисунок 4.9 – Изменение частоты вращения в момент пуска АД

Длительность пуска АД мощностью  $7,5 \text{ кВт}$  составила  $0,7 \text{ с}$ , время работы устройства компенсации пусковых реактивных токов -  $0,5 \text{ с}$ . Ток, потребляемый из сети, при пуске АД с устройством динамической компенсации уменьшился в 1,7 раза. Бросок тока в момент пуска уменьшился с  $97 \text{ А}$  до  $82 \text{ А}$  на 14 %.

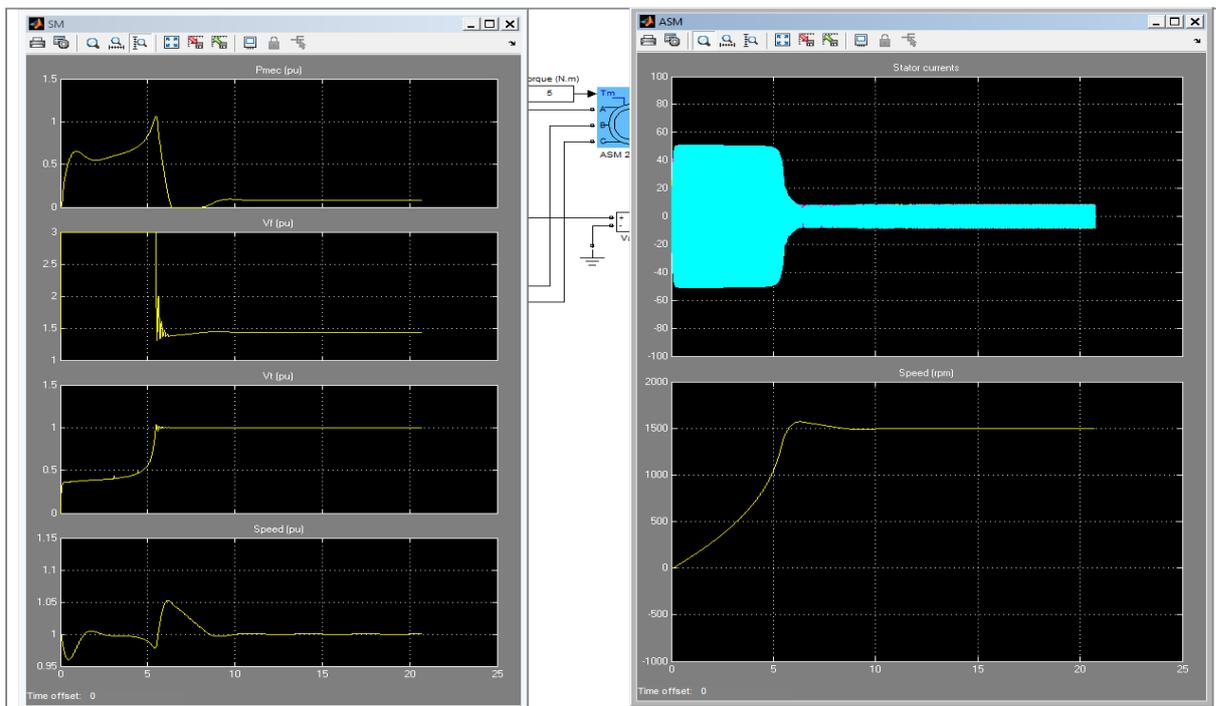
При исследовании режима пуска АД от ДЭС получены следующие результаты.

На рисунке 4.10 а представлены осциллограммы изменения следующих параметров ДЭС во время пуска (в относительных величинах): скорости вращения ДЭС (Sped), величины выходного напряжения ( $V_t$ ), напряжения возбуждения синхронного генератора ( $V_f$ ), механической мощности,

развиваемой дизелем ( $P_{mec}$ ) (обозначения приняты в соответствии с программными обозначениями программы).

На рисунке 4.10 б представлены осциллограммы изменения скорости вращения асинхронного двигателя и токов статора в именованных единицах.

Анализ осциллограмм показывает, что при обычном прямом пуске асинхронного двигателя мощностью 7,5 кВт от ДЭС мощностью 16,0 кВА провал напряжения достигает 60 % от  $U_{ном}$ , длительность пуска АД составила 6 с. Пусковой ток статора – 50 А (амплитудное значение). Частота выходного напряжения за время пуска АД изменялась от 0,96 до 1,05  $f_{ном}$ .



а

б

Рисунок 4.10 – Осциллограммы пуска АД без пусковых конденсаторов от ДЭС

На рисунке 4.11, представлены результаты моделирования пуска ДЭС и АД с пусковыми конденсаторами.

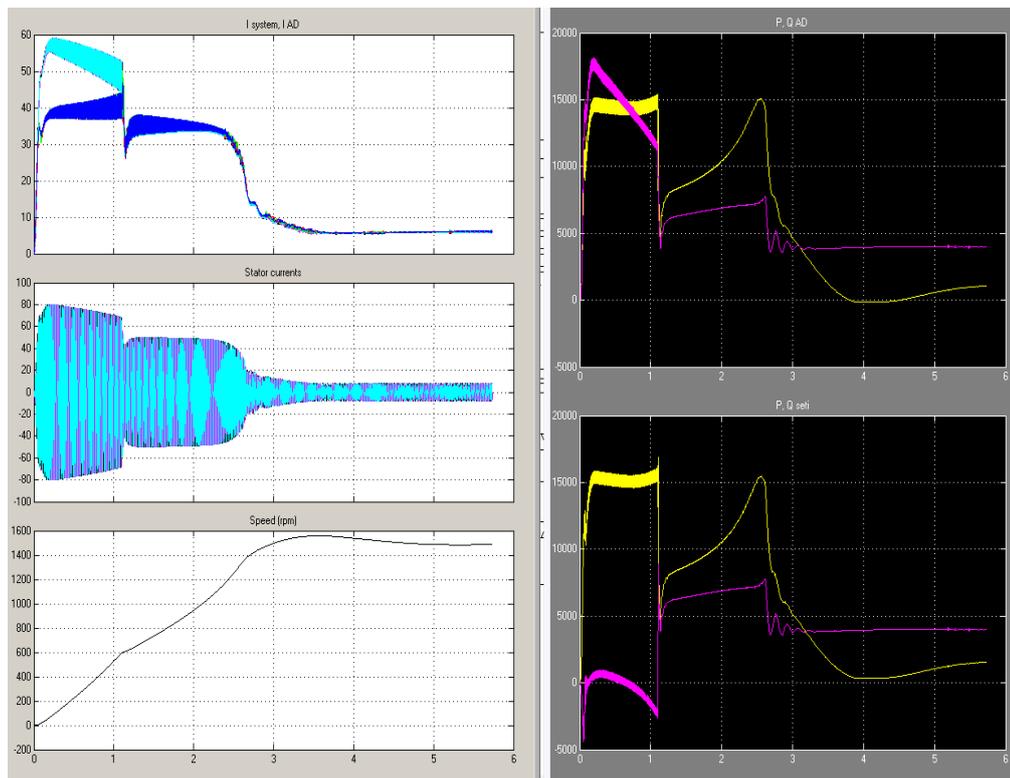


Рисунок 4.11 – Результаты моделирования пуска ДЭС и АД с пусковыми конденсаторами

При пуске АД с пусковыми конденсаторами время пуска сократилось с 6 с до 3 с. Максимальное значение тока АД при пуске составило 60 А, а генератора ДЭС 40 А.

Анализ запуска ДЭС на холостом ходу с изменением мощности генератора (мощность ДЭС 31 кВА) с последующим пуском АД.

Данные пределы отклонения параметров пускового режима укладываются в нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения ГОСТ 32144-2013.

Анализ запуска ДЭС на холостом ходу с изменением мощности (мощность ДЭС 16 кВА) с последующим пуском АД

Пуск АД осуществлялся при  $t = 0,6$ .

Таким образом, динамическая компенсация позволяет улучшить пусковые режимы асинхронных двигателей, при питании их от резервных электростанций.

#### 4.6 Выводы по главе

На основе анализа результатов экспериментального исследования можно сделать следующие выводы:

1. В эксперименте с полярными конденсаторами В43858(К50-35) и шунтирующими диодами 1N5408(Д0-27) в схеме питания асинхронного двигателя, с оценкой доверительного интервала 2,13; вероятностью 95% и средней квадратической ошибкой 0,006 установлено повышение коэффициента мощности 0,65 до 0,78 то есть на 21 %. Проверка экспериментальных и расчетных данных свидетельствует об их совпадении с точностью 3,7 %.

2. На основе исследования работы УКПК в однофазном режиме сети переменного синусоидального тока установлено изменение нагревостойкости в зависимости от продолжительности времени и величины приложенного напряжения. Постоянная времени нагрева составляет порядка 10 мин. Поэтому при использовании УКПК в длительном режиме более 10 мин необходимо предусматривать двойной запас по напряжению.

3. Установлено, что УКПК можно применять с АД в следующих режимах работы:

- в кратковременном режиме
- в повторно-кратковременном;
- в режиме динамической компенсации.

Использование УКПК при длительной работе необходимо предусматривать запас по напряжению в 2 раза.

4. Установлено, что использование УКПК в качестве устройств динамической компенсации, то есть подключение устройства компенсации на полярных конденсаторах только в момент пуска АД, в различных системах сельского электроснабжения позволяет снизить значение пускового тока в 1,7...2,0 раза, величину броска тока на 14...20%, сократить продолжительность запуска до 50 %, а также сохранить показатели качества в пределах нормируемых значений электроэнергии систем малой мощности: отклонение частоты, провал напряжения, отклонение напряжения.

## 5. ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Целью данного раздела является экономическое обоснование устройства компенсации реактивной мощности на полярных электролитических конденсаторах (УКПК).

### 5.1 Методика расчета

Для того, чтобы провести оценку экономической эффективности устройства компенсации реактивной мощности, необходимо сравнить затраты (экономические показатели) на создание и эксплуатацию устройства с экономическим эффектом (показателями его эффективности).

Затраты на создание и эксплуатацию будут складываться из:

- рыночной стоимости полярных электролитических конденсаторов;
- рыночной стоимости выпрямительных диодов;
- рыночной стоимости диэлектрической платы и вспомогательных материалов (провода для соединения элементов схемы, олово и кислота для спайки элементов схемы);
- рыночной стоимости монтажных работ по сборке устройства компенсации реактивной мощности;
- рыночной стоимости работ по технической эксплуатации (на техническое обслуживание и текущий ремонт) устройства компенсации на полярных электролитических конденсаторах.

Экономический эффект от использования устройства будет оцениваться стоимостью сэкономленной электроэнергии.

Однако помимо экономического эффекта УКПК имеет ряд других эффектов, которые сложно оценить экономически:

- габаритные размеры устройства позволяют встраивать его в контактную клеммную коробку электродвигателя и использовать его в качестве устройства индивидуальной компенсации;

- обслуживание устройства совмещается с обслуживанием электродвигателя за счет чего, сокращается время работы обслуживающего персонала.

Простое исходное положение связано с трудностями выбора исходных данных. При полном учете всех влияющих факторов требуется рассматривать все звенья цепи электроснабжения от генератора до потребителей. С достаточной точностью можно рассматривать потребительский трансформатор 10/0,4, воздушные линии 0,4 кВ, присоединенные к этой подстанции, и все потребители этой линии.

Другим подходом служит расчет на одно компенсирующее устройство. Но здесь возникают трудности учета влияния этого устройства на все элементы сети. Это можно избежать, если принять базовую типовую электрическую сеть, что облегчит учет всех факторов.

Таблица 5.1 - Исходные данные для расчета экономической эффективности

№ п/п	Показатели	Значения
1	Номинальная мощность электродвигателя, кВт	2,2
2	Фактическая мощность электродвигателя, кВт	1,58
3		
4	Мощность трансформатора 10/0,4, кВА	250
5	Длина воздушной линии, м	500
6	Марка провода воздушной линии (алюминий)	A16
7	Сечение провода воздушной линии, мм <sup>2</sup>	16
8	Число часов использования электродвигателя, ч/год	700
9	Емкость компенсирующего устройства, мкФ	44
10	Габариты компенсирующего устройства, ммхммхмм	100x100x40
11	Количество отходящих линий от трансформатора, шт.	1*
12	Суммарная мощность нагрузки, кВт	1,58**
13	Исходный коэффициент мощности ( $\cos\varphi_1$ )	0,77
14	Коэффициент мощности ( $\cos\varphi_2$ ) после компенсации (на одном электроприемнике)	0,98

**Примечание:**

\* - количество отходящих линий трансформатора принимаем из условия того, что расчет экономической эффективности выполняется для конкретного электроприемника, на котором установлено устройство компенсации реактивной мощности;

\*\* - суммарная мощность нагрузки трансформатора и отходящей линии принимается по мощности электродвигателя, экономический эффект которого необходимо получить

Определим затраты на создание и эксплуатацию устройства компенсации, а также рассчитаем экономический эффект и показатели эффективности в соответствии с исходными данными.

## 5.2 Затраты на устройство компенсации реактивной мощности

Затраты на устройство компенсации УКПК складываются из затрат на создание устройства и затрат на его эксплуатацию.

### 5.2.1 Затраты на создание устройства

Определим затраты на создание устройства по выражению

$$Z_y = C_K + C_D + C_P + Z_T + Z_{дон}, \quad (5.1)$$

где  $C_K$  – средняя рыночная стоимость полярных электролитических конденсаторов на одно устройство, руб.;  $C_D$  – средняя рыночная стоимость выпрямительных диодов на одно устройство, руб.;  $C_P$  – средняя рыночная стоимость стеклотекстолитовой платы, руб.;  $Z_T$  – затраты труда электронщика на сборку и пайку устройства компенсации РМ, руб.;  $Z_{дон}$  – дополнительные затраты на расходные материалы, требуемые для сборки и пайки устройства, руб.

Рассмотрим составляющие затрат на создание устройства в отдельности.

$$C_K = c_K n_K,$$

где  $c_K$  – средняя рыночная стоимость одного полярного электролитического конденсатора, руб.;  $n_K$  – количество конденсаторов в одном устройстве по рисунку 4.5,  $n_K = 12$  шт.

Стоимость полярных электролитических конденсаторов зависит от количества и качества материалов, которые используются для их создания. Как правило, заводами изготовителями используется следующий состав материалов: обкладки из обработанной алюминиевой фольги, диэлектрический материал в виде специальной масляной бумаги, алюминиевый изолированный

корпус и алюминиевые электроды. Проанализировав рынок и [30], сведем стоимости полярных конденсаторов в таблицу 5.2.

Таблица 5.2 - Рыночная стоимость полярных конденсаторов

Маркировка	$C, \text{ мкФ}$	$U_{AC}, \text{ В}$	$T_{\text{max}}, \text{ }^\circ\text{C}$	$I_{\text{maxAC}}, \text{ А}$ при 50 Гц	Габариты $dxL, \text{ мм}$	Средняя стоимость, руб.
B43858	10	495	105	0,53	12,5x20	22,3
B43858	22	495	105	1,03	16x25	26,5
B43858	33	495	105	1,32	16x31,5	38,5
B43858	47	495	105	1,67	18x31,5	53,3
B43858	68	495	105	2,29	18x40	75,8

Для расчета затрат примем конденсаторы емкостью 22 мкФ для электродвигателя, указанного в эксперименте п.3.2.

$$C_K = 26,5 * 12 = 318,0 \text{ руб.}$$

Рыночная стоимость выпрямительных диодов зависит от качества и вида полупроводниковых материалов электродов, а также напряжения и мощности цепи, в которых используются.

$$C_D = c_D n_D,$$

где  $c_D$  – средняя рыночная стоимость одного выпрямительного диода, руб.;  $n_D$  – количество диодов в устройстве,  $n_D = 6$  шт.

По данным заводов-изготовителей и [110] рассмотрим диоды, удовлетворяющие требованиям устройства по напряжению и току (таблица 5.3).

Таблица 5.3 - Рыночная стоимость выпрямительных диодов

Маркировка	$U_{AC}, \text{ В}$	$T_{\text{max}}, \text{ }^\circ\text{C}$	$I_{\text{пр}}, \text{ А}$	Габариты $dxL, \text{ мм}$	Средняя стоимость, руб.
1N4007	1000	150	1,0	5x6	0,50
1N5399	1000	150	1,5	6x6	1,50
1N5408	1000	150	3,0	6x8	3,80
6A10	1000	150	6,0	8x8	6,0

Для расчета стоимости устройства примем выпрямительные диоды 1N5408, удовлетворяющие требования принятого в эксперименте электродвигателя п. 3.2.

$$C_D = 3,80 * 6 = 22,8 \text{ руб.}$$

Стеклотекстолит – это электроизоляционный материал, который состоит из многослойного спрессованного стекловолокна, пропитанного эпоксидными и фенолформальдегидными смолами. Он выполняется в виде пластин различной толщины и размера. Из стеклотекстолита выполняют электронные платы различной толщины и размера. Рассмотрим стандартный размер стеклотекстолитовой пластины, предназначенной для изготовления электронных плат [110].

Таблица 5.4 - Рыночная стоимость стеклотекстолита

Название	Толщина, мм	Размер, LxN, мм	Средняя стоимость, руб.
СТЭФ	1,00	100x100	18,50
СТЭФ	2,00	100x100	23,80
СТЭФ	3,00	100x100	33,00

Для расчета примем плату толщиной 2,0 мм размером 100x100, используемую в экспериментальном устройстве п.3.2.

$$C_P = 23,80 \text{ руб.}$$

Затраты труда персонала на сборку, пайку и монтаж устройства в соответствии с рисунком 4.5 можно определить как

$$Z_T = NCh_t, \quad (5.2)$$

где  $N$  – количество персонала, чел. (принимаям 2 человека по требованиям техники безопасности [70]),  $Ch$  – часовая тарифная ставка персонала, руб./час (из условия того, что работы выполняют два человека одинаковой должности техника и одинакового 4-го разряда, то по [101]  $Ch = 65,53 \text{ руб./час}$ );  $t$  – продолжительность выполнения работ, ч.

$$Z_T = 2 * 65,53 * 0,5 = 65,53 \text{ руб.}$$

Дополнительные затраты на создание устройства складываются из затрат на материалы для пайки контактов, затрат на электроэнергию

$$Z_{дон} = Z_{кор.} + C_{св}m_{св} + C_K m_K + C_{Э} P_{п} t + C_{пр} l_{пр}, \quad (5.3)$$

где  $Z_{кор.}$  - затраты на корпус, руб., принимаем пластиковый корпус размером 100x100x30,  $Z_{кор.} = 54$  руб.;  $C_{св}$  - стоимость свинца для паяльника, руб., 167,14 руб./кг;  $m_{св}$  - масса свинца требуемая для пайки контактов

$$m_{св} = N_K m_{св.уд}, \quad (5.4)$$

где  $N_K$  - число контактов в устройстве;  $m_{св.уд}$  - удельная масса свинца на один контакт, кг,  $m_{св.уд} = 0,002$  кг;  $C_K$  - стоимость паяльной (ортофосфорной) кислоты, руб., 350 руб./л;  $m_K$  - масса паяльной кислоты для контактов

$$m_K = N_K m_{K.уд}, \quad (5.5)$$

где  $m_{K.уд}$  - удельная масса кислоты на один контакт, л,  $m_{K.уд} = 0,003$  л;  $C_{Э}$  - стоимость электроэнергии, руб./кВт\*ч, [101]  $C_{Э} = 4,51$  руб./кВт;  $P_{п}$  - мощность паяльника, кВт, паяльник типа ЭПСН-40/220 мощностью 0,040 кВт;  $t$  - продолжительность работы паяльника, ч;  $C_{пр}$  - стоимость изолированного провода марки ПВ-3 1x2,5, по [101] 14 руб./м;  $l_{пр}$  - длина проводника, необходимая для безопасного подключения устройства, м.

$$\begin{aligned} Z_{дон} &= 54 + 167,14 * 9 * 0,002 + 350 * 9 * 0,003 + 4,51 * 0,04 * 0,5 + 14 * 1 = \\ &= 3,00 + 9,45 + 0,1 + 14 = 80,55 \text{ руб.} \end{aligned}$$

Тогда затраты на создание устройства

$$Z_y = 318 + 22,8 + 23,80 + 65,53 + 80,55 = 510,68 \text{ руб.}$$

### 5.2.2 Затраты на эксплуатацию устройства

Затраты на эксплуатацию устройство компенсации реактивной мощности определяются в соответствии с особенностями режима работы и конструктивными признаками.

Текущий и капитальный ремонт для устройства проводить не целесообразно, так как конденсаторы и диоды при отказе не подлежат ремонту. В случае отказа конденсатора или диода их заменяют на запасные. А трудоемкость ремонта сопоставима с трудоемкостью работ по созданию этого устройства. Поэтому текущий и капитальный ремонт для устройства компенсации не предусматриваем.

Для поддержания в работоспособном состоянии компенсирующего устройства необходимо проводить техническое обслуживание (ТО), которое заключается в следующих видах работ:

- чистка устройства от пыли;
- проверка контактных соединений;
- проверка крепления.

Выполнение этих работ совместимо с работами в клемной коробке электродвигателя. А поскольку компенсирующее устройство подключено к электродвигателю, то затраты на ТО становятся пренебрежительно малыми. Поэтому техническая эксплуатация не требует значимых затрат труда и материалов на обслуживание.

Таким образом, затраты на компенсирующее устройство

$$Z = 510,68 \text{ руб.}$$

### 5.3 Расчет результатов применения компенсирующего устройства

Экономический эффект  $\mathcal{E}$  от применения компенсирующего устройства заключается в прямом снижении потерь электроэнергии за счет уменьшения тока в линии и, соответственно, повышение пропускной способности линии. Однако, как указывалось выше, будем принимать во внимание только снижение потерь в линии, то есть эффект внедрения от сбереженной электроэнергии  $W_{сбер}$  ( $\text{кВт} \cdot \text{ч}$ )

$$\mathcal{E} = C_{\mathcal{E}} W_{сбер}. \quad (5.6)$$

Эта энергия является высвобожденной вследствие снижения потерь. Поскольку снижение потерь проходит на трех этапах, в электроприемнике, линии и трансформаторе (рисунок 5.1), то сбереженная электрическая энергия

$$W_{сбер} = \Delta W_1 + \Delta W_2 + \Delta W_3, \quad (5.7)$$

где  $\Delta W_1$  – количество электрической сбереженной в электродвигателе,  $\text{кВт} \cdot \text{ч}$ ;  $\Delta W_2$  – количество электроэнергии, сбереженной в линии,  $\text{кВт} \cdot \text{ч}$ ;  $\Delta W_3$  – количество электроэнергии, сбереженной в трансформаторе,  $\text{кВт} \cdot \text{ч}$ .



Рисунок 5.1 - Схема электроснабжения электродвигателя

Рассмотрим сбережение электроэнергии на каждом этапе электроснабжения.

Снижение потерь в электродвигателе не происходит. Поскольку потери прямопорциональны квадрату силы тока и активному сопротивлению, которые не зависят от изменения коэффициента мощности, так как устройство компенсации включено параллельно обмоткам двигателя. Величина тока в электродвигателе в данном случае зависит от нагрузке на валу. Поэтому при проверке экономического эффекта применения компенсирующего устройства не влияет на величину потерь в электродвигателе

$$\Delta W_1 = 0.$$

Количество сбереженной электроэнергии зависит от величины снижения потерь в линии. Состав линии, качество контактных соединений и аппараты защиты линии влияют на потери в линии, учет которых затруднен с недостаточностью данных. Однако существенное значение на величину потерь оказывает величина тока и активное сопротивление воздушной линии

$$\Delta W_2 = \Delta P_{ном.л.} t, \quad (5.8)$$

где  $t$  – продолжительность использования электродвигателя в год, ч;  $\Delta P_{ном.л.}$  – количество активной мощности, полученной за счет снижения потерь в питающей линии, кВт

$$\Delta P_{ном.л.} = P_{ном.л.1} - P_{ном.л.2}, \quad (5.9)$$

где  $P_{ном.л.1}$  – потери в питающей электродвигатель линии до компенсации (без устройства компенсации реактивной мощности с полярными конденсаторами), кВт

$$P_{ном.л.1} = m (I_1)^2 k_R R_l 10^{-3}, \quad (5.10)$$

где  $m$  – число фаз в линии,  $m = 3$ ;  $I_1$  – фазное значение тока в питающей линии до компенсации, А;  $k_R$  – коэффициент учитывающий увеличение активного сопротивления в питающей линии из-за некачественных контактов, переходных процессов и т.д.,  $k_R = 2,7$  [49];  $R_l$  – активное сопротивление воздушной линии, Ом.

$$P_{\text{пот.л.2}} = m (I_2)^2 k_R R_l 10^{-3}, \quad (5.11)$$

где  $I_2$  – фазное значение тока в питающей линии после компенсации, А.

Выразим ток в линии через мощность электроприемника на конце линии, то есть электродвигателя  $P_{\text{дв.}}$  (Вт)

$$I_1 = \frac{P_{\text{дв.}}}{U \cos \varphi_1}, \quad (5.12)$$

где  $U$  – линейное напряжение питающей линии, В;  $\cos \varphi_1$  – коэффициент мощности без компенсации реактивной мощности, о.е.

$$I_2 = \frac{P_{\text{дв.}}}{U \cos \varphi_2}, \quad (5.13)$$

где  $\cos \varphi_2$  – коэффициент мощности после компенсации, о.е.

Тогда с учетом (5.12) и (5.13) выражение (5.9) примет вид

$$\Delta P_{\text{пот.л.}} = \frac{m P_{\text{дв.}}^2 k_R \rho_l l_l}{U^2 S_l} \left( \frac{1}{(\cos \varphi_1)^2} - \frac{1}{(\cos \varphi_2)^2} \right) 10^{-3}, \quad (5.14)$$

где  $\rho_l$  – удельное электрическое сопротивление материала линии, для алюминия [26]  $\rho = 0,028 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$ ;  $l_l$  – длина линии,  $l_l = 500$  м (из исходных данных, таблица 4.1);  $S_l$  – площадь поперечного сечения,  $\text{мм}^2$ ,  $S_l = 16 \text{ мм}^2$  (таблица 4.1).

Примем условия загрузки электродвигателя на 95 %, тогда с учетом полученных данных коэффициента мощности потери в линии составят

$$\Delta P_{\text{пот.л.}} = \frac{3 \cdot 1580^2 \cdot 2,7 \cdot 0,028 \cdot 500}{380^2 \cdot 16} \left( \frac{1}{(0,77)^2} - \frac{1}{(0,98)^2} \right) 10^{-3} = 0,0793 \text{ кВт}.$$

Тогда

$$\Delta W_2 = 0,0793 \cdot 700 = 55,51 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

В трансформаторе снижение потерь во вторичной обмотке ведет к снижению потерь в первичной обмотке, которые делятся на потери в стали и потери в меди (еще такие потери называют соответственно потери холостого хода и потери короткого замыкания). С учетом этого рассмотрим снижение потерь в трансформаторе при сравнении его работы до и после компенсации реактивной мощности

$$\Delta W_3 = \Delta P_{nom.mp} t, \quad (5.15)$$

где  $t$  – продолжительность использования электродвигателя в год, ч;  $\Delta P_{nom.mp}$  – количество активной мощности, полученной за счет снижения потерь в трансформаторе, кВт

$$\Delta P_{nom.mp} = \Delta P_{nom.mp.BH} + \Delta P_{nom.mp.HH}, \quad (5.16)$$

где  $\Delta P_{nom.mp.BH}$ ,  $\Delta P_{nom.mp.HH}$  – соответственно снижение потерь в обмотке высшего напряжения и низшего напряжения, кВт.

Рассмотрим снижение потерь в обмотке высшего напряжения

$$\Delta P_{nom.mp.BH} = (P_{nom.cm.BH1} + P_{nom.m.BH1}) - (P_{nom.cm.BH2} + P_{nom.m.BH2}), \quad (5.17)$$

где  $P_{nom.cm.BH1, 2}$  – потери в стали трансформатора, кВт;

$$P_{nom.cm.BH1} = P_{nom.cm.BH2}$$

потери в стали трансформатора не зависят от условий компенсации, поэтому они в выражении (5.17) взаимоуничтожаются;  $P_{nom.m.BH1, 2}$  – потери в меди первичной обмотки трансформатора до и после компенсации, кВт.

Потери в меди высшей обмотки трансформатора определяется через коэффициент трансформации  $k_{TP}$  и величины тока во вторичной обмотке

$$P_{nom.m.BH1} = \frac{m P_{\text{дв.}}^2 R_{BH}}{k_{TP}^2 U^2 \cos^2 \varphi_1} 10^{-3}, \quad (5.18)$$

где  $k_{TP}$  – коэффициент трансформации,  $k_{TP} = 25$  [49];  $R_{BH}$  – активное сопротивление первичной обмотки трансформатора (принимается из справочных данных)  $R_{BH} = 4,49$  Ом [49].

Тогда с учетом (5.18) и аналогично с потерями в меди после компенсации

$$\Delta P_{nom.mp.BH} = \frac{m P_{\text{дв.}}^2 R_{BH}}{k_{TP}^2 U^2} \left( \frac{1}{(\cos \varphi_1)} - \frac{1}{(\cos \varphi_2)} \right) 10^{-3}.$$

Или

$$\Delta P_{\text{ном.тр.ВН}} = \frac{3 \cdot 1580^2 \cdot 4,49}{25^2 \cdot 380^2} \left( \frac{1}{(0,77)^2} - \frac{1}{(0,98)^2} \right) 10^{-3} = 0,00024 \text{ кВт}$$

Рассмотрим снижение потерь в обмотке низшего напряжения

$$\Delta P_{\text{ном.тр.НН}} = (P_{\text{ном.ст.НН1}} + P_{\text{ном.м.НН1}}) - (P_{\text{ном.ст.НН2}} + P_{\text{ном.м.НН2}}), \quad (5.19)$$

где  $P_{\text{ном.ст.НН1, 2}}$  – потери в стали трансформатора, которые также не зависят от условий компенсации, поэтому они в выражении (5.19) взаимоуничтожаются;  $P_{\text{ном.м.НН1, 2}}$  – потери в меди во вторичной обмотке трансформатора до и после компенсации, кВт.

Потери в меди вторичной обмотки трансформатора до компенсации определяются

$$P_{\text{ном.м.ВН1}} = \frac{m P_{\text{ог.}}^2 R_{\text{НН}}}{U^2 \cos^2 \varphi_1} 10^{-3}, \quad (5.20)$$

где  $R_{\text{ВН}}$  – активное сопротивление вторичной обмотки трансформатора (принимается из справочных данных)  $R_{\text{ВН}} = 0,0168 \text{ Ом}$  [49].

Потери в меди вторичной обмотки трансформатора после компенсации

$$P_{\text{ном.м.ВН2}} = \frac{m P_{\text{ог.}}^2 R_{\text{НН}}}{U^2 \cos^2 \varphi_2} 10^{-3}, \quad (5.21)$$

Тогда с учетом (5.20) и (5.21)

$$\Delta P_{\text{ном.тр.ВН}} = \frac{3 \cdot 1580^2 \cdot 0,0168}{380^2} \left( \frac{1}{(0,77)^2} - \frac{1}{(0,98)^2} \right) 10^{-3} = 0,00056 \text{ кВт}.$$

Потери в трансформаторе

$$\Delta P_{\text{ном.тр.}} = 0,00024 + 0,00056 = 0,0008 \text{ кВт}.$$

Тогда сэкономленная электроэнергия в трансформаторе

$$\Delta W_3 = 0,0008 \cdot 700 = 0,56 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Таким образом, на основе данных расчетов получим сэкономленное количество электроэнергии в сравнении без компенсации и с компенсацией на базе устройства компенсации полярными конденсаторами

$$W_{\text{сбер}} = 55,51 + 0,56 = 56,07 \text{ кВт}.$$

С учетом цены на электроэнергию  $\text{Ц}_\text{Э}$  [101] экономический эффект составит

$$\mathcal{E} = 4,51 * 56,07 = 252,9 \text{ руб.}$$

Определим показатели экономической эффективности от внедрения компенсирующего устройства на базе полярных электролитических конденсаторах:

- средний, максимальный и минимальный срок окупаемости;
- чистый дисконтированный доход за 5 лет эксплуатации;
- индекс доходности.

Цены на конденсаторы и другие комплектующие и стоимость электроэнергии для предприятий различных регионов страны могут изменяться, поэтому рассчитаем средний, максимальный и минимальный сроки окупаемости затрат в компенсирующее устройство

$$T_{ок} = Z/\mathcal{E}, \quad (5.22)$$

$$T_{ок max} = 3(1+\gamma) / \mathcal{E}(1-\gamma), \quad (5.23)$$

$$T_{ок min} = 3(1-\gamma) / \mathcal{E}(1+\gamma), \quad (5.24)$$

где  $Z$  – затраты на компенсирующее устройство, руб.;  $\mathcal{E}$  – экономический эффект от использования устройства, руб.;  $\gamma$  – доля изменения стоимостей капиталовложений и экономического эффекта  $\pm 10\%$  ( $\gamma = \pm 0,1$ ) [101].

$$T_{ок} = 510,68 / 252,9 = 2,01 \text{ года,}$$

$$T_{ок max} = 561,7 / 227,61 = 2,46 \text{ года,}$$

$$T_{ок min} = 459,61 / 278,2 = 1,65 \text{ года.}$$

В мировой практике наибольшее распространение получил метод оценки экономической эффективности – расчет чистого дисконтированного дохода и индекса доходности.

Чистый дисконтированный доход или интегральный эффект определяется по выражению [101]

$$\text{ЧДД} = \frac{\sum_1^T D}{(1+E)^t} - \frac{\sum_0^T Z}{(1+E)^t}, \quad (5.25)$$

где  $D$  – чистый денежный доход за период эксплуатации объекта, руб.;  $Z$  – затраты на приобретение и эксплуатацию, руб.;  $E$  – норма дисконта, о.е.;  $T$  – продолжительность расчетного периода или горизонт расчета, год,  $T = 7 \text{ лет}$ ;  $t$

– номер шага расчета по годам, начиная с момента начала осуществления проекта.

В рыночной экономике при использовании собственного капитала норма дисконта определяется, исходя из депозитного процента по вкладам, а на практике она выше этого процента за счет инфляции и риска, связанного с вложениями. Примем норму дисконта равную 15 % ( $E = 0,15$ ) [101].

Индекс доходности или индекс прибыльности проекта определяется по выражению

$$\text{ИД} = \frac{\frac{\sum_1^T Д}{(1+E)^t}}{\frac{\sum_0^T З}{(1+E)^t}}, \quad (5.26)$$

Найдем чистый дисконтированный доход для компенсирующего устройства в течение 5 лет, при норме дисконта 15%.

Расчет чистого дисконтированного дохода сведен в таблицу 5.5.

Таблица 5.5 - Расчет чистого дисконтированного дохода ( $E = 0,15$ )

Показатели	Горизонт расчета (годы)							
	0	1	2	3	4	5	6	7
Капиталовложения, руб.	511	-	-	-	-	-	-	-
Годовая экономия, руб.	0	253	253	253	253	253	253	253
Дисконтный множитель	1	0,870	0,756	0,658	0,572	0,497	0,43	0,37
Приведенная разность, руб.	-511	220	191	166	144	125	109	95
ЧДД, руб.	541							
Индекс доходности, руб./ руб.	2,0							

Сведем данные показателей экономической оценки использования компенсирующего устройство на полярных электролитических конденсаторах и сравним их с данными экономической оценки компенсирующих устройств на традиционных слюдяных конденсаторах (таблица 5.6). Параметры слюдяных конденсаторов соответствуют параметрам полярных конденсаторов по напряжению, емкости для принятого электродвигателя.

Таблица 5.6 - Показатели сравнительной экономической эффективности использования

Наименование показателя	УК на конденсаторах ДПС-0,6-40	УК на полярных электролитических конденсаторах В43858	Индекс изменения показателя, о.е.
Затраты на создание устройства, руб.	1050	510,68	-2,6
Вес, кг	0,63	0,15	-4
Объем, см <sup>3</sup>	1000	300	-3,3
Годовой экономический эффект, руб.	252,9	252,9	0
Срок окупаемости, год	5,4	2,01	-2,7
Чистый дисконтированный доход*, руб.	2,6	541,9	+209

#### 5.4 Оценка экономической эффективности УКПК для сети 0,4 кВ

Целью данного параграфа является оценка экономической эффективности использования УКПК для объекта исследования в виде сети 0,4 кВ, в которую входит питающий трансформатор мощностью 250 кВА и три отходящие от него линии со смешанной нагрузкой.

Примем параметры сети 0,4 кВ, указанные в таблице 5.7.

Таблица 5.7 – Параметры отходящих линий со смешанной нагрузкой  
ТП 250

№ линии	Протяженность, км	Режим работы	Кол-во АД 1,5 кВт	Кол-во АД 2,2 кВт	Кол-во АД 5,0 кВт	Сечение провода S, мм <sup>2</sup>	Примечание
Линия 1	500	S1	2	2	1	16	-
Линия 2	1000	S1	2	2	1	25	-
Линия 3	1500	S1	2	2	1	35	-

Условимся, что нагрузка находится в конце линии, а продолжительность работы электродвигателей (АД) в среднем составляет 800 ч. Тогда с учетом выражений (5.1) – (5.22) определим параметры каждой отходящей линии и результаты сведем в таблицу 5.8.

Таблица 5.8 – Показатели экономической эффективности УКПК  
в сети 0,4 кВ

№ Линии	$W_{\text{потр. до}}^{\text{компенс.}}$ , $\text{кВт} \cdot \text{ч}$	Затраты на УКПК $З$ , руб.		Сбереженная эл.энергия, $\text{кВт} \cdot \text{ч}/\text{год}$		$C_{\text{э}}$ , $\text{руб.}/\text{кВт} \cdot \text{ч}$	$\text{Э}$ , руб.	$T_{\text{ок}}$ , год	Снижение потерь эл.энергии, %
		$З_{\text{у}}$	$З_{\text{э}}$	$\Delta W_2$	$\Delta W_3$				
Линия 1	10164,6	2575,0	7822	715,6	3,2	4,51	3241,8	-	7,0
Линия 2	10409,3	2575,0	7822	1007,5	3,2	4,51	4558,3	-	9,7
Линия 3	10654,1	2575,0	7822	1325,9	3,2	4,51	5994,2	-	12,4
<b>Итого для сети 0,4 кВ</b>	<b>31228</b>	<b>7725,0</b>	<b>23466</b>	<b>3049,0</b>	<b>9,6</b>	<b>4,51</b>	<b>13794,3</b>	<b>2,26</b>	<b>9,8</b>
<b>Примечание:</b> $З_{\text{э}}$ – затраты на годовую техническую эксплуатацию УКПК, которые рассчитываются из условия дополнительных часов работы электромонтера на каждой линии 10 ч в год (часовая тарифная ставка 78,22 руб./ч)									

Таким образом, экономический эффект от годового использования УКПК в качестве индивидуальной компенсации для системы: трансформатор 10/0,4 кВ мощностью 250 кВА с тремя отходящими линиями с осветительной, производственной и смешанной нагрузкой, составляет 13794 руб. Срок окупаемости УКПК равен 2,3 года.

### 5.5 Выводы по главе

Использование компенсирующего устройства на полярных электролитических конденсаторах дает ряд эффектов за счет учета низкой стоимости конденсаторов и снижения материалоемкости.

Установлено, что устройство компенсации реактивной мощности полярными конденсаторами в 2,6 раз ниже стоимости устройств на традиционных слюдяных конденсаторах. При внедрении УКПК в сеть с питающим трансформатором 10/0,4 кВ, мощностью 250 кВА для трех отходящих линий со смешанной нагрузкой экономический эффект составит 13794 руб., срок окупаемости 2,26 года. Снижение потерь электроэнергии составляет 9,8 %.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Сельские электрические сети 0,4 кВ имеют нестабильные характеристики. Длина линии изменяется от 250 до 900 м, мощность – от 8 до 32 кВт, сечение проводов – от 16 до 70 мм<sup>2</sup>, распределены на большой территории. Они имеют резко неравномерные графики нагрузки по времени и по фазам. Все это увеличивает потери энергии в сетях. Технические потери в них составляют 20...25 % от полезного потребления энергии. При этом половина из них обусловлена потреблением реактивной энергии из сети, то есть низким коэффициентом мощности.

2. Совокупность сельских сетей следует представлять объектом изучения, состоящим из подстанции 10/0,4 кВ с трансформатором 250 кВА и тремя отходящими линиями 0,4 кВ, первая из которых питает бытовую нагрузку, вторая – силовую и третья – смешанную нагрузку. Потребителями индуктивной мощности служат в основном асинхронные двигатели от 1 до 10 кВт. Определены статистические характеристики линий по структуре нагрузки и ее линейной плотности.

3. Разработана методика выбора конденсаторов для компенсации реактивной мощности, в которой поэтапно определяется оптимальный тип конденсатора, основные оптимальные параметры по критерию минимальных затрат, а также обосновывается схема и место установки устройства компенсации. По оценочной функции минимальных затрат на устройство рекомендованы полярные электролитические конденсаторы для комбинированного способа компенсации реактивной мощности.

4. Обоснованы условия включения полярных конденсаторов по схемам «звезда» и «треугольник», а также выбор числа  $n$  последовательно соединенных конденсаторов в одной ветви и  $m$  ветвей. Предложена схема целевой компенсации, которая позволяет увеличивать время использования компенсирующего устройства в 2-3 раза. Она подтверждена патентом РФ на полезную модель № 158228.

5. Установлено, что использование УКПК в качестве устройств динамической компенсации, позволяет снизить значение пускового тока в 1,7...2,0 раза, а также сохранить показатели качества (отклонение частоты, провал напряжения, отклонение напряжения) в пределах нормируемых значений электроэнергии.

6. Экспериментально подтверждена работоспособность УКПК в сети переменного тока в однофазном и трехфазном режимах. При номинальной нагрузке АД коэффициент мощности увеличивается с 0,65 до 0,78 то есть на 21 %. Проверка экспериментальных и расчетных данных свидетельствует об их совпадении с точностью 3,7 %.

7. УКПК можно применять с АД в следующих режимах работы:

- в кратковременном режиме
- в повторно-кратковременном;
- в режиме динамической компенсации.

Использование УКПК при длительной работе необходимо предусматривать запас по напряжению в 2 раза.

8. Установлено, что устройство компенсации реактивной мощности полярными конденсаторами в 2,6 раз ниже стоимости устройств на традиционных слюдяных конденсаторах. При внедрении УКПК в сеть с питающим трансформатором 10/0,4 кВ, мощностью 250 кВА для трех отходящих линий со смешанной нагрузкой экономический эффект составит 13794 руб., срок окупаемости 2,26 года. Снижение потерь электроэнергии составляет 9,8 %.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Алюминиевые электролитические конденсаторы: Справочник / EPCOS.* – 2010. – с. 624.
2. *Аксенов, В. В.* Компенсация реактивной мощности с фильтрацией токов высших гармоник – реальный путь повышения энергоэффективности передачи и распределения электроэнергии / В.В. Аксенов, Д.В. Быстров, В.Э. Воротницкий [ и др.] // *Электрические станции.* - 2012. - № 3. - С. 57–60.
3. *Айзенберг, Б. Л.* Вопросы методики определения и снижения потерь электроэнергии в электрических сетях /Б.Л. Айзенберг, В.М. Дмитриев, Л.Д. Клебанов.// Под ред. Б. А. Константинова. – Тр. Ленингр. Инж. – экон. ин-та, вып. 21. – Л.: НИС-ЛИЭИ, 1958. – 119 с.
4. *Артюхов, И. И.* Компенсация реактивной мощности в электрических сетях до 1000 В: учеб. пособие / И. И. Артюхов, А. В. Коротков, С. Ф. Степанов. Саратов: Саратов. Гос. Техн. Ун-т, 2007. 64 с. ISBN 987-5-7433-1852-0.
5. *Буторин, В. А.* Экономическая эффективность оптимизации количества запасных элементов к электроприводам в птицеводстве / В. А. Буторин, Р.В. Банин. // Науч. тр. Костанайского ГУ. – Костанай, 2001. – 43 с.
6. *Бородин, И. Ф.* Потери электроэнергии в сельских сетях и пути их снижения /И.Ф. Бородин, А.П. Сердешнов // *Техника в сельском хозяйстве.* - 2002. - №1. - С. 23–26.
7. *Барг, И. Г.* Самонесущий изолированный провод Торсада / И. Г. Барг, А.Н. Жулев // *«Энергетическое строительство».* – 1995. – №2 – С. 49–52.
8. *Баев, В. И.* Проблема снижения потерь электрической энергии в сельских электрических сетях Волгоградской области / В.И. Баев, С.В. Панченко, С.В. Шульга // Научное обеспечение национального проекта «Развитие АПК»: материалы науч.-практ. конф., – Волгоград: ИПК «Нива», 31 января – 2 февраля 2007 г.- С.168–169.

9. *Бахмутская, В. В.* Основы энергосбережения / В.В. Бахмутская, В.Д. Елкин // Практическое пособие. - Гомель. ГГТУ им. П.О. Сухого. - 2006 г. С.14–16.
10. *Будзко, И. А.* Электроснабжение сельского хозяйства / И.А. Будзко, Т.Б. Лещинская, В.И. Сукманов. – М. Колос, 2000. - С.138–140.
11. *Бессонов, Л. А.* Теоретические основы электротехники / Л. А. Бессонов. – М.: Высшая школа, 1996. - С.134–138.
12. *Будзко, И. А.* Электроснабжение сельского хозяйства / И.А. Будзко, В. Ю. Гессен. – М.: Колос, 1979.– 87 с.
13. *Будзко, И. А.* Электроснабжение сельскохозяйственных предприятий и населенных пунктов / И. А. Будзко, М. С. Левин – М.: Агропромиздат, 1985. – 28 с.
14. *Ванеев, Б. Н.* Надежность асинхронных электродвигателей / Б. Н. Ванеев, В. Д. Главный, В. Н. Гостищев и др. - Киев: Техника, 1983.– 143 с.
15. *Виноградов, А. В.* Определение стоимости потребленной электроэнергии в зависимости от ее качества / А. В. Виноградов, М. В. Бородин. // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве: тр. 8-й Международная научно-техническая конференция Ч.1. проблемы энергообеспечения и энергосбережения. - М.: ГНУ ВИЭСХ, 2012.– С. 342–346.
16. *Вешенский, С. Н.* Характеристики двигателей в электроприводе / С.Н. Вешенский// – М.: Энергия, 1977.– С. 154–157.
17. *Винословский, В. Н.* Оптимизация энергопотребления в сетях с несимметричными нагрузками / В. Н. Винословский, Л. Б. Терешкович // Промышл. Энергетика. – 1983. – №8.– 38 с.
18. *Вольдек, А. И.* Электрические машины / А.И. Вольдек – Л.: Энергия, 1974. – С. 234.
19. Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года: Распоряжение Правительства Российской Федерации от 27 декабря 2010 г. № 2446-р. – М.: Прим. ред: текст распоряжения опубликован в "Собрании законодательства РФ". - 24.01.2011, N 4, ст. 622.

20. ГОСТ 23728-88. Техника сельскохозяйственная. – М.: Издательство стандартов, 1989. – 10 с.
21. Горбунов, А. О. Определение параметров трансформатора и линии 0,38 кВ экспериментальным способом /А.О. Горбунов, М.Ю. Теремичкий. // Известия СПбГАУ, 2010. - № 20. С.333-340 и С. 82–85.
22. Ганелин, А. М. Экономия электроэнергии в сельском хозяйстве /А.М. Ганелин. – М.: Колос, 1983.– С. 47–49.
23. Григорьев, Н. Д. Определение потерь энергии в сельских сетях 0,38 кВ / Н.Д. Григорьев // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1973. –№7.– 72 с.
24. Грудинский, П. Г. Об определении потерь энергии во время потерь / П.Г. Грудинский, Н.М. Сыч //Электричество, 1969.– № 2.– С. 77 – 79.
25. Делягтин, В. Н. Оценка перспективной стоимости электроэнергии для сельскохозяйственных потребителей / В. Н. Делягтин // Теоретический и научно-практический журнал «Механизация и электрификация сельского хозяйства».– 2013. – № 2. – С.12–14.
26. Дайнеко, В. А. Энергооборудование сельскохозяйственных предприятий / В. А. Дайнеко, А. И. Ковалинский. - Минск: Изд-во Новое знание, 2008. – С.253–255.
27. Дьяконов В.П. MATLAB 7, Самоучитель / В.П. Дьяконов // ДМК Пресс – 2008. – 768 с.
28. Ерошенко, Г. П. Оптимальные характеристики малых электроремонтных цехов / Г. П. Ерошенко, Б. Р. Калыков, Л. А. Садыкова. – Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2003. – № 4. –19 с.
29. Ерошенко, Г. П. Эксплуатация энергооборудования сельскохозяйственных предприятий / Г. П. Ерошенко, М. А. Таранов, Ю. А. Медведко. – Ростов – на – Дону: Терра, 2001. – 590 с.
30. Ерошенко, Г. П. Эксплуатационные свойства электрооборудования / Г. П. Ерошенко. Саратов: издательство Саратовского института, 1983. – 180 с.

31. *Ермолаев, С. А.* Эксплуатация энергооборудования в сельском хозяйстве / С. А. Ермолаев, Е. П. Масюткин, В. Ф. Яковлев. – Киев. Изд-во Инкос, 2005. – С.375–378.

32. *Железко, Ю. С.* Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии / Ю. С. Железко. - Руководство для практических расчетов. - М.: ЭНАС,– 2009. - 456 с.

33. *Жежеленко, И. В.* Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях / И. В. Жежеленко. – Киев: Техника, –1981. – 23 с.

34. *Жежеленко, И. В.* Качество электроэнергии на промышленных предприятиях / И. В. Жежеленко, М. Л. Рабинович, В. М. Божко. – Киев: Техника, –1981.– С. 56–59.

35. *Зиниев, Ш. З.* Требования к средствам компенсации реактивной мощности / Г. П. Ерошенко, Ш. З. Зиниев // Научное обозрение. - 2013. – №1. – С. 73 – 75.

36. *Зиниев, Ш. З.* Выбор режимов работы конденсаторных установок / Г. П. Ерошенко, Ш. З. Зиниев, Р. А-М. Магомадов // Аграрный научный журнал –2014. – Вып. № 12. – С. 56 – 58.

37. *Зиниев, Ш. З.* Выбор места включения конденсаторных установок / Г. П. Ерошенко, Ш. З. Зиниев. // Научное обозрение. – 2015. – №3. – С. 93–95.

38. *Зиниев, Ш. З.* Экономия электроэнергии в сельскохозяйственных асинхронных электроприводах за счет плавной индивидуальной компенсации реактивной мощности / Ш.З. Зиниев. // ВЕСТНИК №1 – Грозный: ФГБОУ ВПО «Чечен. ГУ», – 2013. – С. 143–145.

39. *Зиниев, Ш. З.* Снижение потерь электроэнергии в сельскохозяйственных электросетях / Ш. З. Зиниев, Г.П. Ерошенко, А. Д. Овчаров // Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы IV Международной науч.-практ. конф. – Саратов: ФГБОУ ВПО «Сар. ГАУ», – 2013 – С. 100 – 102.

40. *Зиниев, Ш. З.* Обоснование объекта исследования при снижении потерь электрической энергии в сельскохозяйственных электросетях /

Ш. З. Зиниев // ВЕСТНИК №1 – Грозный: ФГБОУ ВПО «Чечен. ГУ», – 2014. – С. 56–58.

41. *Зиниев, Ш. З.* Потери электроэнергии и пути их снижения в сельскохозяйственных электросетях / Ш. З. Зиниев, Р. А-М. Магомадов. // III Всероссийская научно-практическая конференция «Молодежь, наука, инновации» – Грозный: ФГБОУ ВПО «ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова», – 2014. – С. 38 – 40.

42. *Зиниев, Ш. З.* Потери мощности в элементах систем сельской электрификации / Ш.З. Зиниев. // Всероссийская молодежная научно-практическая конференция «Компьютерные технологии и телекоммуникации». – Грозный: ФГБОУ ВПО «ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова», – 2014. – С. 105 – 107.

43. *Зайцев, С. Г.* Проблемы оценки экономической эффективности внедрения регулируемого электропривода в современной энергетике России / С. Г. Зайцев // Промышленная энергетика. – 2000. – № 10. – С. 76–79.

44. *Зимин, Е. Н.* Электрооборудование промышленных предприятий и установок / Е. Н. Зимин, В. И. Преображенский, И. И. Чувашов. – М.: Энергоиздат, 1981. – С. 27–29.

45. *Залесский, А. М.* Передача электрической энергии / А.М. Залесский. – М.: Госэнергоиздат, 1948. – 355 с.

46. *Идельник, В. И.* Электрические системы и сети / В. И. Идельник. - Учебник для вузов.– М.: Энергоатомиздат, 1989. – 138 с.

47. *Ильинский, Н. Ф.* Энергосбережение в электроприводе / Н. Ф. Ильинский, Ю. В. Рожанковский, А. О. Горнов. – М.: Высшая школа, 1989. – 73 с.

48. Инструкция по учету потерь электрической энергии в сетях районных управлений. – М.: Госэнергоиздат, 1961. – 16 с.

49. *Карпов, В. Н.* Научное, методическое и организационное содержание стратегии решения проблемы отраслевого энергосбережения в АПК / В. Н. Карпов // Труды международной научно-технической конференции

«Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве» – 2012. – С. 75–80.

50. *Кобозев, В. А.* Энергосбережение в силовом электрооборудовании сельскохозяйственного производства / В. А. Кобозев. – Ставрополь: «АГРУС» – 2004. – С. 245–248.

51. *Кобзистый, О. В.* Анализ несимметричных и несинусоидальных режимов работы многофазных электрических цепей / О. В. Кобзистый // Теоретический и научно-практический журнал «Механизация и электрификация сельского хозяйства» - 2013. – № 5 – С. 18–19.

52. *Косоухов, Ф. Д.* Метод расчета показателей несимметрии напряжений и токов в сетях 0,38 кВ / Ф. Д. Косоухов, А. О. Горбунов, М. Ю. Теремичкий [и др.] // Известия вузов. Электромеханика. Специальный выпуск. – 2008. – С.156–159.

53. *Косоухов, Ф. Д.* Метод анализа схем трансформаторного симметрирующего устройства / Ф. Д. Косоухов, А. О. Филиппов // Сб. науч. тр.: Проблемы энергообеспечения предприятий АПК и сельских территорий. – СПб: СПбГАУ. - 2008. – С. 13–18.

54. *Косоухов, Ф. Д.* Несимметрия напряжений и токов в сельских распределительных сетях / Ф. Д. Косоухов, И. В. Наумов. - Иркутск: Изд-во Иркутской ГСХА. – 2003. – 260 с.

55. *Кучинский, Г.С.* Силовые электрические конденсаторы / Г. С. Кучинский, Н. И. Назаров. – М: Энергопромиздат, – 1992.– С. 18-21

56. *Каминский, Е. А.* Звезда, треугольник, зигзаг / Е.А.Каминский. – М.: Энергоатомиздат, – 1984. – С. 18–21.

57. *Карташов, И. И.* Качество электроэнергии в системах электроснабжения / И. И. Карташов // Способы его контроля и обеспечения / Под ред. М.А. Калугиной. – М.: Издательство МЭИ, – 2000. – 73 с.

58. *Кузнецов, В. Г.* Снижение несимметрии и несинусоидальности напряжений в электрических сетях / В. Г. Кузнецов, А. С. Григорьев, В.Б.Данилюк. – Киев: Наукова думка, 1991. – 37 с.

59. *Кезевич, В. В.* Зависимость числа часов потерь от использования максимума / В.В. Кезевич // Электрические станции. - 1948. – № 9.– С. 29 – 31.
60. *Кобозев, В. А.* Пути энергосбережения в электроприводах сельскохозяйственных машин / В.А. Кобозев // Методы и технические средства повышения эффективности применения электроэнергии в сельском хозяйстве, Сб. науч. тр. – Ставрополь: СХИ, – 1991.– 92 с.
61. *Кобозев, В. А.* Основы энергосбережения в асинхронном электроприводе / В.А. Кобозев. – Ставрополь, –1999. – 106 с.
62. *Кобозев, В. А.* Основные направления энергосбережения в асинхронном электроприводе / В.А. Кобозев // Энергетика и энергосбережение Ставропольского края. – Ставрополь: СевКавГТУ. – 2001. – 23 с.
63. *Корепанова, О. Ю.* Разработка методов оценки энергосбережения с применением конденсаторных установок для распределительных сетей АПК: дис. канд. наук: 05.20.02: защищена в 2009 г. / О. Ю. Корепанова. – Ижевск: 2009. – 149 с.
64. *Лезнов, Б. С.* Экономия электроэнергии в насосных установках / Б. С. Лезнов. - М.: Энергоатомиздат, – 1991. – 17 с.
65. *Левин, М. С.* Качество электроэнергии в сетях сельских районов / М. С. Левин, А. Е. Мурадян, Н. Н. Сырых. – М.: Энергия, – 1975. – С.84–87.
66. *Лещинская, Т. Б.* Электроснабжение сельского хозяйства / Т. Б. Лещинская. - Учебники и учебные пособия для студентов средних специальных учебных заведений. – М.: Колос. - 2006. - 368 с.
67. *Липский, А. М.* Взаимосвязь показателей качества электроэнергии в сетях с резкопеременными нагрузками / А. М. Липский // Электричество. – 1987. – №4. – 74 с.
68. *Литвак, В. В.* Основы регионального энергосбережения / В. В. Литвак. – Томск: НТЛ. - 2002.– С. 53–55.
69. *Мугалимов, Р. Г.* К проектированию асинхронного двигателя с индивидуальной компенсацией реактивной мощности / Р. Г. Мугалимов, А. Р. Мугалимова // Электрические системы и комплексы: Межвузовский

сборник научных трудов под ред. Сарварова А.С. - Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», – 2007. – С. 121–130.

70. *Мамедов, О. Г.* Научные основы повышения эксплуатационной надежности погружных электродвигателей / О. Г. Мамедов. - Монография. Баку: Изд-во «Элм». - 2010.– 184 с.

71. *Мугалимова, А. Р.* Опыт проектирования и создания энергосберегающих асинхронных двигателей с индивидуальной компенсацией реактивной мощности / А.Р. Мугалимова // Электромеханика. Электротехнологии. Электротехнические материалы и компоненты: XII Международная конференция. Труды МКЭЭЭ. – Крым, Алушта. – 2008. – 216 с.

72. *Мугалимов, Р. Г.* Определение емкости компенсирующего конденсатора асинхронного двигателя с индивидуальной компенсацией реактивной мощности (статья) / Р. Г. Мугалимов, А. Р. Мугалимов // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 3: в 5 ч. - Тула: Изд-во ТулГУ. - 2010. - Ч. 4. – С. 115–120.

73. *Минаков, В. Ф.* Классификация и характеристика рабочих, аномальных и аварийных режимов трехфазных асинхронных двигателей / В. Ф. Минаков [и др.]. // Методы и технические средства повышения эффективности применения электроэнергии в сельском хозяйстве: Сб. науч. тр. – Ставрополь: ГСХА. – 1996.– 37 с.

74. *Муравлев, О. П.* Энергосбережение и регулируемый электропривод с асинхронными двигателями / О. П. Муравлев, О. О. Муравлева // Вестник УГТУ УПИ. Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии. Управляемые электромеханические системы: Сборник статей: Общие вопросы электрических машин и трансформаторов. Машинно-вентильные системы. Вопросы диагностики. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ. – 2003. – № 5.– С. 47–49.

75. *Мельников, Н. А.* Регулирование напряжения в электрических сетях / Н. А. Мельников, Л. А. Солдаткина. – М.: Энергия. – 1968. – 152 с.

76. *Наумов, И. В.* Оптимизация проектирования и развития систем сельского электроснабжения. Теоретические обобщения / И. В. Наумов, О. А. Балышев. - Монография. – Иркутск: изд-во «ИрГСХА». – 2001. – 4 с.

77. *Никольский, О. К.* Оценка риска сельских электрических сетей / О. К. Никольский, Н. И. Черкасова // Научно-теоретический журнал «Техника в сельском хозяйстве», – 2013. – № 6.– С. 21–23.

78. *Оськин, С. В.* Основные показатели надежности электропривода сельскохозяйственных машин / С. В. Оськин, Г. М. Оськина // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2003. – №5. – 29 с.

79. *Овчаров, В. В.* Эксплуатационные режимы работы и непрерывная диагностика электрических машин в сельскохозяйственном производстве. / В. В. Овчаров. – Киев: УСХА. – 1990. – 28 с.

80. *Плотников, М. П.* Компенсация реактивной мощности в районных сетях / М. П. Плотников // Молодой ученый. – 2011. – №12. Т.1. – С. 37–39.

81. Правила устройства электроустановок. 7-е изд. - М.: Изд-во Омега. – 2013.– 268 с.

82. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. - М.: Изд-во «Норматика». - 2012. – 192 с.

83. *Панькин, В. В.* Определение срока службы электродвигателей и ПЗА на животноводческих фермах / В. В. Панькин, Ю. С. Борисов // Тр. ВИЭСХ. М. - 1979. – Т. 48. – С. 55–63.

84. *Пястолов, А. А.* Эксплуатация электрооборудования / А. А. Пястолов, Г. П. Ерошенко. – М.: ВО «Агропромиздат». – 1990. – 287 с.

85. *Подольский, Д. С.* Разработка методики мониторинга качества электрической энергии в электрических сетях: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02: защищена в 2009 г. / Д. С. Подольский. – Москва. - 2009. - 155 с.

86. *Поспелов, Г. Е.* К вопросу рациональных потерь напряжения в линиях электропередачи / Г. Е. Поспелов, Н. М. Сыч // В кн.: Прикладные проблемы энергетики. – Минск: Высшая школа, 1975. – №2. – С. 71–73.

87. *Поспелов, Г. Е.* Учет и оценка потерь мощности и энергии в электрических сетях энергосистем / Г. Е. Поспелов, Н. М. Сыч. – Минск: БПИ, – 1976. – 78 с.

88. *Поспелов, Е. Г.* Алгоритм определения потерь мощности и энергии от перетоков реактивной мощности в протяженных линиях электропередачи / Г. Е. Поспелов // *Электричество*. – 1974. – № 8. – С. 62–64.

89. *Радин, В. И.* Снижение потерь электроэнергии в асинхронных двигателях / В. И. Радин, Е. В. Радина // *Электротехника*. - 1982. – №6.– 73 с.

90. *Сукьясов, С. В.* Применение технических средств симметрирования нагрузок в сельских распределительных сетях 0,38 кВ для повышения качества и снижения потерь электрической энергии: дис. канд. техн. наук: 05.20.02. защищена в 2004 г. / С. В. Сукьясов. – Иркутск : 2004. – 172 с.

91. *Савиных, В. В.* Определение и снижение потерь электроэнергии в нормальных режимах сетей 0,4 кВ сельских населенных пунктов: дис. канд. техн. наук: 05.20.02. защищена в 2007 г. / В. В. Савиных. – Краснодар : 2007. – 108 с.

92. *Савина, Н. В.* Повышение эффективности и качества электроснабжения промышленных предприятий / Н. В. Савина, Ю. Л. Саенко, И. В. Жежеленко. – Киев: Знание. - 1990. – 24 с.

93. *Теремицкий, М. Ю.* Экспериментальное исследование потерь и показателей качества электрической энергии в сельских сетях 0,38 кВ / М. Ю. Теремицкий // *известия СПбГАУ*. - 2010.– № 20. – С. 328–333.

94. Об энергосбережении и о повышении эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: Федеральный закон № 261-ФЗ. – от 23.11.2009.

95. *Фурсанов, М. И.* Определение и анализ потерь электроэнергии в электрических сетях энергосистем / М. И. Фурсанов. - Минск: УВИЦ при УП «Белэнергосбережение». – 2005. – 128 с.

96. *Филянович, Л. П.* Расчет потерь энергии в распределительных электрических сетях на основе факторно-кластерных моделей: дис. канд. техн. наук: 05.14.02. защищена в 1984 г. / Л. П. Филянович. – Минск: 1984. – 93 с.

97. *Хныков, А. В.* Теория и расчет трансформаторов / А. В. Хныков. - М.: СОЛОН – Прессю. - 2004. – С. 13–15.
98. *Черных, И. В.* Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. – ДМК Пресс – 2008. – С. – 288.
99. *Черкасова, Н. И.* Стратегия развития существующих сельских распределительных сетей 10/0,4 кВ / Н.И. Черкасова // Научно-теоретический журнал «Техника в сельском хозяйстве». – 2013.– № 5.– С.12–14.
100. *Черкасова, Н. И.* Моделирование, анализ и оптимизация потерь в распределительных электрических сетях 10/0,4 кВ / Н. И. Черкасова. - монография. - Новосибирск: Новосибирский ГТУ. – 2008. – 96с.
101. *Черкасова, Н. И.* Повышение энергоэффективности системы сельского электроснабжения компенсирующими устройствами / Н. И. Черкасова // Теоретический и научно-практический журнал «Механизация и электрификация сельского хозяйства». – 2013. – № 6. – С. 17–18.
102. *Четвертков, И. А.* Справочник по электрическим конденсаторам / И.А. Четвертков. – М: Изд-во: Радио и связь. – 1987. - С. 8–10.
103. *Шидловский, А. К.* Повышение качества электрической энергии в распределительных сетях с несимметричными нагрузками / А. К. Шидловский, В. Г. Кузнецов // Проблемы технической термодинамики. – Киев: Наукова думка, – 1976.– № 59.
104. *Шишкин, С. А.* Повышение эффективности энергосбережения в электросетях предприятий АПК при компенсации реактивной мощности: дис. канд. техн. наук: 05.20.02. защищена в 2004 г. / С.А. Шишкин. – Москва: 2004. – 125 с.
105. *Шлаф, М. М.* Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / М.М. Шлаф, А. Э. Кравчик, В. И. Афонин, Е. А. Соболенская. – М.: Энергоиздат, – 1982.– 32 с.
106. *Шнак, Д. А.* Повышение эффективности функционирования трехфазного электропривода в условиях несимметричной нагрузки сельских

распределительных сетей 0,38 кВ: дис. канд. техн. наук: 05.20.02. защищена в 2008 г. / Д.А. Шпак. – Иркутск: 2008. – 108 с.

107. Орлова, И. Н. Электротехнический справочник: В 3-х т. Т. 3: В 2-х кн. Кн. 2. Использование электрической энергии / И. Н. Орлова. под общ. ред. Профессоров МЭИ: И. Н. Орлова (гл. ред.) [и др.]. – М.: Энергоатомиздат. – 1988. – С.77–79.

108. Юндин, М.А. Особенности протекания небалансированных токов в сети напряжением 0,38 кВ / М. А. Юндин, С. В. Нехаев // Техника в сельском хозяйстве. – 2008. – № 5. – С. 17–19.

109. Butchbaker, A. F. Electricity and Electronics for agriculture / A. F. Butchbaker //– Ames (Iowa): Iowa state university press. – 1977.– 41 p.

110. Bishop, K. W. I. Application off variable frequency AC drives / K. W. I. Bishop // Power semiconductors and theirapplications. – London, 1977.–P. 17–19.

111. И 111032. Исследование электродвигателей. Проведение хозяйственных и контрольных испытаний электродвигателей 4А: Науч. отчет по договору с ВНИПТИЭМ, выполненный по координационному плану ВИЭСХ 16.35 / Науч. рук. Пястолов А.А., отв. исп. Буторин В.А., Ильин Ю.П. и др. № Г.Р. 81012029. - Челябинск: ЧИМЭСХ. - 1982. - 105 с.

112. Dantels, M.R. Modern transformer core materials / M.R. Dantels // «GES Review». – 1990. – № 3.–P. 74–77

113. Savina, N.V. Modeling of parameters of the electric power quality characterizing non – sinusoidal and asymmetry of voltage / N. V. Savina // Electrical Power Quality and Utilization: proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conferense EPQU, 19 – 21 september 2001. – Cracow, Poland. - 2001. – P. 173–178.

114. Savina, N. V. Optimalcompencation of reactive power in distribution nets as means of voltage regulation [Электронныйресурс] / N. V. Savina, Y. V. Krivohizha, Y. V. Myasoedov // ieeexplore/ iee. org: digital library. – Lodz, 2009. - Режим доступа: <http://ieeexplore.iee.org>. – (Дата обобщения – 06.11.2009).

115. Savina, N. V. The integrated assessment of power loses in power supply sustems caused by poor quality [Электронныйресурс] / N.V. Savina // ieeexplore/

ieee.org: digital library. – Lodz, 2009. – Режим доступа: <http://ieeexplore.iee.org>. – (Дата обобщения - 06.11.2009).

116. *Annapandi, P.* Unified Power Quality Conditioner for voltage and current compensation [Электронныйресурс]/ P. Annapandi. – Режим доступа: <http://ieeexplore.iee.org>. – (Дата обобщения - 12.08.2013).

117. *Imad, H. I.* Energy Efficiency Improvement by Raising of Power Factor at Industrial Sector in Palestine [Электронныйресурс] / H. I. Imad, M. M. Marwan //– Режим доступа: <http://ieeexplore.iee.org>. – (Дата обобщения - 12.08.2013).

118. *Santos-Azevedo, M. S.* Multiobjective optimization of the reactive power compensation in electric distribution systems [Электронныйресурс] / M. S. Santos-Azevedo, U. Holanda-Bezerra. //– Режим доступа: <http://ieeexplore.iee.org>. – (Дата обобщения - 12.08.2013).

119. *Akbulut, M.* Reactive power management and regional reactive load forecast in Turkish electricity energy market [Электронныйресурс] / M. Akbulut, O Gul. – Режим доступа: <http://ieeexplore.iee.org>. – (Дата обобщения - 12.08.2013).

120. *KiranKumar, M.* Methods to reduce aggregate technical and commercial losses of electricity [Электронныйресурс] / M. KiranKumar, K.V. Sairam, R. Santosh. – Режим доступа: <http://ieeexplore.iee.org>. – (Дата обобщения - 12.08.2013).

121. *Heravan, R.* Analysis of technical energy losses by using simulation [Электронныйресурс] /R. Heravan. – Режим доступа: <http://ieeexplore.iee.org>. – (Дата обобщения - 12.08.2013).

122. *Grigoras, G.* Estimation of Power/Energy Losses in Electric Distribution Systems based on an Efficient Method [Электронныйресурс] / G. Grigoras, V. Alexandrescu, G. Catrina. – Режим доступа: <http://ieeexplore.iee.org>. – (Дата обобщения - 12.08.2013).

## ПРИЛОЖЕНИЯ

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 158228

**УСТРОЙСТВО ЦЕЛЕВОЙ КОМПЕНСАЦИИ  
РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ**

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова" (RU)*

Автор(ы): *с.м. на обороте*

Заявка № 2015109546

Приоритет полезной модели 18 марта 2015 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 02 декабря 2015 г.

Срок действия патента истекает 18 марта 2025 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев



## ПРИЛОЖЕНИЕ Б



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по НРиИ

И.Г. Гайрабеков

2017г

## Акт

## внедрения результатов диссертационной работы в учебный процесс

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационных исследований Зиниева Шамсудина Зелимовича по теме «Снижение потерь электроэнергии в сельских электрических сетях напряжением до 1000 В применением устройств компенсации реактивной мощности на полярных конденсаторах» внедрены в учебно-методическое сопровождение образовательного процесса на основании решения кафедры «Электротехника и электропривод» и рекомендаций Ученого Совета Института прикладных и информационных технологий (протокол №5 от 29.01.2017г. заседания кафедры «Электротехника и электропривод» и протокол №4 от 17.02.2017г. заседания Ученого Совета Института прикладных и информационных технологий) для подготовки бакалавров по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника.

На основании результатов диссертационных исследований разработаны и внедрены учебно-методические материалы по выполнению комплекса лабораторных работ по учебным дисциплинам: «Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов» и «Электроснабжение».

Директор ИПИТ, д.п.н., профессор



Д. А. Аписултановна

Заведующий кафедрой  
«Электротехника и электропривод»

Магомадов Р.А.-М.



Годовой эффект с сэкономленной электроэнергией в размере 404 руб.  
УКПК рекомендуется к внедрению в качестве мероприятия по  
экономии электроэнергии и повышения энергетической эффективности  
предприятия.

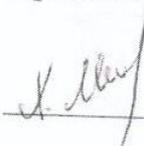
Представители ФГБОУ ВО

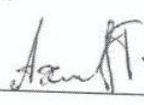
Саратовский ГАУ

 Г.П. Ерошенко

 Ш.З. Зиниев

Представители ООО «Беркут-Агро»

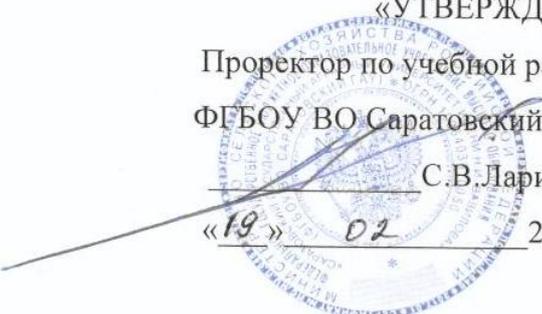
 М.Х. Хасульбеков

 гл. инженер



## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

«УТВЕРЖДАЮ»  
 Проректор по учебной работе  
 ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ  
 С.В.Ларионов  
 «19» 02 2017г.



## Акт-внедрения

результатов диссертационной работы

Зиниева Шамсудина Зелимовича

На кафедре «Инженерная физика, электрооборудование и электротехнологии»(ИФ, ЭиЭ) аспирантом Зиниевым Ш.З. ведется научно-исследовательская работа по изучению устройств компенсации реактивной мощности и разработке устройства индивидуальной компенсации реактивной мощности.

Результаты диссертационной работы Зиниевым Ш.З. внедрены в учебном процессе на кафедре «ИФ, ЭиЭ» при подготовке студентов соответствующего профиля.

Разработаны методические материалы для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Эксплуатация электрооборудования».

Кроме того полученные результаты научно-исследовательской работы используются в учебном процессе магистрантами направления подготовки «Агроинженерия» профиля «Электрооборудование и электротехнологии».

Декан ФИП

Д.А. Соловьев

Зав. кафедрой «ИФ, ЭиЭ»

В.А. Трушкин

