

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**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Саратов 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова».

Научный руководитель

Ерошенко Геннадий Петрович
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Степанов Сергей Федорович
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Электроснабжение и
электротехнология» ФГБОУ ВО СГТУ имени
Гагарина Ю. А.

Сошинов Анатолий Григорьевич
кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Электроснабжение
промышленных предприятий» Камышинского
технологического института (филиал) ФГБОУ
ВО «Волгоградский государственный
технический университет»

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный
аграрный университет имени И.Т. Трубилина»

Защита диссертации состоится «__» ____ 2017 г. в 12⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 220.061.03 на базе ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова» по адресу: 410056, г. Саратов, ул. Советская, 60, ауд. 325.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова» и на сайте www.sgau.ru

Отзывы на автореферат направлять по адресу: 410012, г. Саратов, Театральная пл. 1, ученому секретарю диссертационного совета Д220.061.03.

e-mail: chekmarev.v@yandex.ru

Автореферат разослан «__» ____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Чекмарев Василий Васильевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. 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% от общего потребления электроэнергии. 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 напряжением до 1000 В на новом техническом уровне.

Электротехническая промышленность освоила выпуск новых высокоэффективных полярных конденсаторов, которые могут заменить не оправдавшие себя бумажные конденсаторы. Однако такая замена сдерживается из-за малой изученности применения полярных конденсаторов в сельских электрических 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 сельских электрических сетей напряжением до 1000 В 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 электрической 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 сбереженной 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 сельских электрических сетей 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).

По результатам исследований получен патент РФ на полезную модель № 158228 от 18.03.2015 г., опубликовано 11 статей, в том числе 3 статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающей в себя 122 наименования, и 4 приложений. Основное содержание работы изложено на 153 страницах текста, содержит 41 таблиц, 30 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, представлена общая характеристика работы и определены основные направления исследования.

В первой главе «Анализ характеристик сетей сельскохозяйственного назначения и способов снижения потерь электроэнергии» приведена общая

характеристика проблемы, выбрано направление исследования и намечены пути решения основных задач. Рассмотрены характеристики парка сельскохозяйственных приводов, проведен анализ потерь мощности в элементах системы сельской электрификации, где объектами изучения служат подстанция 10/0,4 кВ и низковольтные линии, содержащие однофазных и трехфазных потребителей. Выявлено, 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, то есть с позиций совершенствования не только электрооборудования, но и технологий сельскохозяйственного производства. Последние предполагают увеличение продолжительности и загрузки электрооборудования, более широкое внедрение автоматизации, применение поточных линий и т.п. Однако принципиальные особенности сельскохозяйственной отрасли затрудняют работу в этом направлении. Главная из них обусловлена тем, что во всех процессах сельского хозяйства участвует «биологическое звено», то есть живые организмы. Именно они определяют своеобразную суточную, сезонную и годовую ритмичность выполнения работ, следовательно, использование электрооборудования. Все это создает серьезные трудности в разработке и организации способов снижения потерь электроэнергии.

Проверенным способом снижения потерь электрической энергии служит использование конденсаторов для компенсации реактивной мощности, однако в сельских электрических сетях они применяются в редких случаях. Можно предположить, что это объясняется высокой стоимостью (до 800 руб./кВАр) и большими габаритами традиционных бумажных конденсаторов. В настоящее время созданы новые разнообразные полярные конденсаторы с низкими габаритно-стоимостными показателями. Однако их применение в цепях переменного тока не изучено. Поэтому возникла задача обоснования возможности применения полярных конденсаторов для компенсации реактивной мощности в электрических сетях сельскохозяйственного назначения.

Во второй главе «Теоретические исследования применения полярных конденсаторов в сетях сельскохозяйственного назначения» выделен объект исследования и обоснованы параметры устройства УКПК, обеспечивающего необходимый уровень компенсации.

По результатам анализа электрических сетей до 1000 В сельских районов установлена резкая нестабильность их характеристик. Длина отдельных линий изменяется от 250 до 900 м, электрическая нагрузка – от 8 до 32 кВт, сечение провода – от 16 до 70 мм². Технические потери в этих сетях достигают до 25% от передаваемой электроэнергии, почти половина из них обусловлена низким коэффициентом мощности потребителей.

Устройства компенсации реактивной мощности применяется в отдельных случаях.

Для обоснования рациональных средств и способов повышения

коэффициента мощности теоретическое исследование заключается в следующем:

- обоснование объекта исследования;
- обоснование выбора оптимального типа конденсатора;
- расчет параметров выбранных конденсаторов;
- сравнение и выбор рациональных схем соединения конденсаторов;
- обоснование места включения конденсаторов в сети.

Обоснование объекта исследования. На первом этапе объектом принята линия со средними для сельского хозяйства параметрами. Однако такая линия имеет большую вариацию параметров и недостаточно полно характеризует всю совокупность исходных данных. Потребовалось ввести дополнительные параметры линий, характеризующие структуру нагрузки X и распределение нагрузки вдоль линии $K_{лн}$ – коэффициент линейной плотности нагрузки, *о.е.*:

$$X = \frac{P_c}{P}, \quad (1)$$

$$K_{лн} = \frac{P_k}{P_n}, \quad (2)$$

где P_c , P – мощность силовых (индуктивных) и суммарных нагрузок, *кВт*; P_k , P_n – удельная нагрузка (на единицу длины линии) в конце и начале линии, *кВт/м*.

Это позволило учесть распределение нагрузки вдоль линии P_l , суммарную мощность P и представить их уравнениями:

$$P_l = P_n \left[1 + (K_{лн} + 1) \frac{l}{a} \right], \quad (3)$$

$$P = P_n L \left[\frac{K_{лн} + 1}{a} \right], \quad (4)$$

где l , L – текущая и полная длина линий, *м*; a – количество электроприемников на полной длине линии, *шт*.

Результаты статистического анализа, (таблица 1), свидетельствуют о том, что объектами исследования должны быть линии с производственной и со смешанной нагрузками. Линия с осветительной и коммунально-бытовой нагрузками исключены из рассмотрения из-за высокого коэффициента мощности.

Таблица 1– Статистические характеристики сельских линий

	Характеристики	Осветительная нагрузка	Производственная нагрузка	Смешанная нагрузка
1	Протяженность (м)	900,0	250,0	500,0-900,0
2	Нагрузка головного участка (кВт)	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

Для выделенных линий компенсировать реактивную мощность можно разными типами конденсаторов: бумажными, новыми поколениями косинусных конденсаторов (типа КПС), полярными (типа YAGEO серия SG, типа KENDEIL серия K04), электролитическими неполярными (типа KENDEIL серия K13).

Бумажные конденсаторы исключены из рассмотрения в связи с низкой эффективностью. Все остальные типы отличаются малыми габаритами и стоимостью. Полярные конденсаторы предназначены для цепей выпрямленного напряжения. Но в литературе имеется сообщение о возможности их применения в цепях переменного тока и приводятся такие примеры для электронных установок. С этой целью используют не один, а два конденсатора, шунтированных диодами (рисунок 1, а). После поисковых экспериментов в работе дополнительно предложены схемы для трехфазных цепей (рисунок 1, б и в). При этом напряжение каждого конденсатора должно быть не меньше амплитудного, а емкость в два раза больше требуемой расчетной.

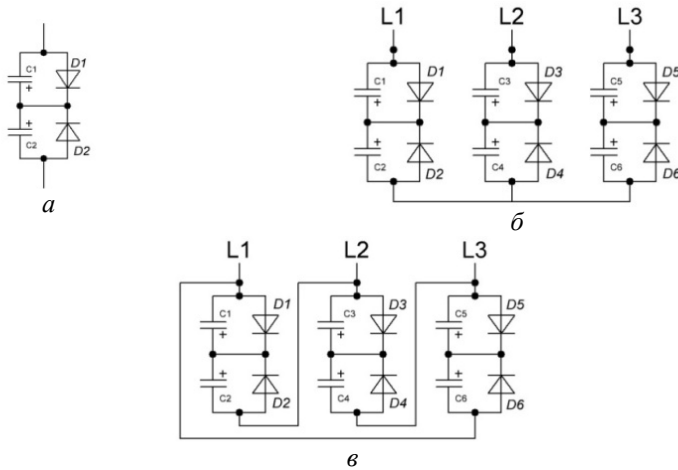


Рисунок 1 – Схемы включения полярных конденсаторов в цепи переменного тока:
 а – однофазная цепь; б – трехфазная цепь по схеме «звезда»; в – трехфазная цепь по схеме «треугольник» ($L1, L2, L3$ – питающие линии трехфазной системы, $C1, C2, \dots, C6$ – полярные конденсаторы, $D1, D2, \dots, D6$ – диоды)

Выбор оптимального типа конденсатора. Тип конденсатора можно определить путем расчета и сравнения критериев оптимальности для заданных условий применения. В рассматриваемой ситуации условия применения неоднозначны из-за разной длины линий и ее нагрузки, сечения провода, линейной плотности нагрузок и т.п. Анализ показал, что выбор типа конденсаторов относится к решению задачи в условиях неопределенности.

Задача состоит в следующем. Задано n типов конденсаторов ($C_1, C_2, \dots, C_i, \dots, C_n$), где n – варианты выбора (решений). Взамен точных

сведений известен лишь набор возможных условий применения конденсаторов ($E_1, E_2, \dots, E_j, \dots, E_m$), где m – варианты условий (стратегий). Требуется определить наилучший вариант выбора.

Семейство решений описывается матрицей решений, содержащей n вариантов выбора и m условий применения

	E_1	E_2	E_j	E_m
C_1	e_{11}	e_{21}	e_{j1}	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}

При выборе варианта используют принцип максимальной полезности при наилучших условиях

$$\max e_{i2} = \max(\max e_{ij}), \quad (5)$$

либо максимальной полезности при наихудших условиях

$$\max e_{i2} = \max(\min e_{ij}). \quad (6)$$

При исследовании конденсаторов в качестве оценочной функции приняты затраты на $\kappa Bm^*ч$ сэкономленной электроэнергии в течение года

$$e_{ij} = \frac{Z_{kij}}{\Delta W_{ij}}, \quad (7)$$

где Z_{kij} – затраты на конденсаторы, руб.; ΔW_{ij} – сэкономленная электроэнергия, $\kappa Bm^*ч$.

Далее по справочным данным находим

$$Z_{kij} = u_{ki} \kappa_{mi} \kappa_{ci} Q_i, \quad (8)$$

где u_{ki} – удельная стоимость конденсатора, руб./ κBAr ; $\kappa_{mi} = 1, 2 \dots 1, 3$ – коэффициент увеличения затрат на автоматику и монтаж, о.е.; $\kappa_{ci} = 2 \dots 3$ – коэффициент схемы, о.е.; Q_i – реактивная мощность конденсаторов, κBAr .

Годовое количество сэкономленной электроэнергии рассчитываем по выражению

$$\Delta W_{ij} = \frac{Q_i^2 R_i T}{U^2}, \quad (9)$$

где R_i – сопротивление проводов линии, Ом; T – годовое число часов использования конденсаторов, ч/год; U – напряжение сети, В.

После подстановки (9) и (8) в (7) оценочная функция приобретает вид

$$e_{ij} = \frac{u_{ki} \kappa_{mi} \kappa_{ci} U^2}{Q_i R_i T}. \quad (10)$$

Затем принимается условный критерий оптимальности и по нему находится окончательный вариант.

Среди известных критериев оптимальности (Вальда, Байеса-Лапласа, Сэвиджа и др.) чаще используют в технических задачах критерий Вальда. Он оценивает позицию крайней осторожности и позволяет выбрать вариант с максимальной полезностью при наихудших условиях.

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

После подстановки всех данных нашей задачи матрица решений примет вид (таблица 2)

Таблица 2 – Матрица решений

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

где C_1 – косинусный конденсатор, C_2 – полярный конденсатор типа SG, C_3 – полярный конденсатор типа K50.

Таким образом, по критерию Вальда лучшим вариантом является выбор полярных электролитических конденсаторов. Они гарантируют наименьшие затраты при наихудших условиях.

Расчет параметров выбранных конденсаторов. Для выбранного типа конденсаторов и схемы их соединения определяют напряжение U_k , емкость C_k , реактивную мощность Q_k и ток I_k конденсаторов.

Напряжение конденсатора должно удовлетворять неравенству

$$U_k \geq \frac{2UK_3}{n}, \quad (11)$$

где U – сетевое напряжение, B (для схемы «звезда» $U = 220 B$, «треугольник» $U = 380 B$); n – число последовательно включенных конденсаторов, *шт.*; $K_3 = 1,05 \dots 1,10$ – коэффициент запаса по напряжению, *о.е.*

Емкость конденсатора C_k определяется исходным $\cos\varphi_1$ ($\operatorname{tg}\varphi_1$) и достигаемым $\cos\varphi_2$ ($\operatorname{tg}\varphi_2$) коэффициентами мощности, мощностью P нагрузки сети.

При индивидуальной компенсации

$$C_k = \frac{P(\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2)}{\omega U^2} = K_k P, \quad (12)$$

где $K_k = (\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2) / \omega U^2$ – постоянная компенсации ($K_k = 0,015 \cdot 10^{-6}$ при $U = 380 B$, $K_k = 0,025 \cdot 10^{-6}$ при $U = 220 B$).

Для групповой компенсации учтен переменный характер нагрузки. Обычно для этого используют многоступенчатый временный график. Для сетей сельских территорий предложена линейная аппроксимация такого графика

$$P_t = p_0 t, \quad (13)$$

где P_t – текущее значение мощности, *кВт*; p_0 – удельная мощность нарастаний

графика, $\kappa\text{Вт}/\text{ч}$.

В итоге получена расчетная формула

$$C = K_K \int_0^{T_u} p dt = \frac{1}{2} K_K p_0 T_u, \quad (14)$$

где T_u – годовое число часов использования конденсаторов, ч.

Реактивную мощность и ток определяют по формулам:

$$\left. \begin{aligned} Q_k &= U^2 \omega C_p \\ I_k &= U \omega C_p \end{aligned} \right\}, \quad (15)$$

где C_p – результирующая емкость, зависящая от схемы включения конденсаторов в батарею, мкФ .

Из уравнений (12-15) определяем коэффициент мощности после компенсации индивидуальным способом

$$\text{tg} \varphi_2 = \text{tg} \varphi_1 - \frac{C \omega U^2}{P}. \quad (16)$$

Параметры конденсаторов, найденные по заданному наибольшему значению коэффициента мощности ($\cos \varphi_2 = 0,95$), не всегда приводят к лучшему результату. Поэтому в работе выполнена оптимизация параметров по минимуму суммарных затрат, включающих затраты на конденсаторы Z_κ и стоимость энергии Z_ρ .

Затраты на конденсаторы равны

$$Z_\kappa = E Q_\kappa u_\kappa, \quad (17)$$

где Q_κ и u_κ – реактивная мощность, $\kappa\text{Вар}$, и стоимость 1 $\kappa\text{Вар}\cdot\text{руб.}$, батареи конденсаторов, E – коэффициент нормативных отчислений, $o.e.$

Затраты на потери в сети

$$Z_\rho = u_\rho \left(\frac{Q - Q_\kappa}{U} \right)^2 R T_u, \quad (18)$$

где Q – реактивная мощность нагрузки, $\kappa\text{Вар}$; U и R – напряжение и сопротивление линии, B и Ом ; T_u – годовое число часов использования электроустановки, ч; u_ρ – удельная стоимость электроэнергии, $\text{руб.}/\kappa\text{Вт}\cdot\text{ч}$.

Суммарные затраты:

$$Z = Z_\kappa + Z_\rho = E Q_\kappa u_\kappa + \left(\frac{Q - Q_\kappa}{U} \right)^2 u_\rho R T_u, \quad (19)$$

Далее определяем первую производную и решаем уравнение

$$\frac{dZ}{dQ_\kappa} = u_\kappa E + 2(Q - Q_\kappa) \frac{u_\rho R T_u}{U^2} = 0, \quad (20)$$

В итоге получаем оптимальную мощность и емкость конденсатора

$$\left. \begin{aligned} Q_{\kappa}^0 &= Q - \frac{y_{\kappa} E U^2}{2 R y_{\kappa} T_u} \\ C_{\kappa}^0 &= \frac{Q_{\kappa}^0}{U^2 \omega} \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

Выбор схемы включения. Шкала напряжений и емкостей полярных конденсаторов отличается от шкалы силового электрооборудования по шагу нарастания. Чтобы обеспечить выполнение условий (21), УКПК приходится комплектовать в виде батареи конденсаторов, как показано на рисунке 2.

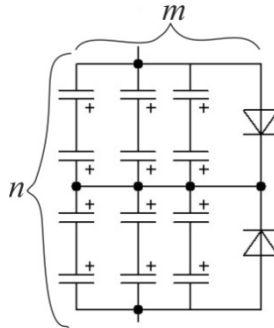


Рисунок 2 – Общий вид батареи УКПК: m – количество параллельных ветвей с полярными конденсаторами, n – количество конденсаторов в ветви

В общем случае каждое плечо состоит из n –последовательно и m –параллельно соединенных конденсаторов. При большом числе конденсаторов возникает задача оценки стоимости компенсирующего устройства. Примем линейную аппроксимацию стоимости одного конденсатора

$$3 = aC_{\kappa} + bU_{\kappa}, \quad (22)$$

где a – удельная стоимость конденсатора, руб./мкФ; b – удельная стоимость по напряжению конденсатора, руб./В; C_{κ} , U_{κ} – емкость (мкФ) и напряжение (В) конденсатора.

Количество конденсаторов в одном плече одной фазы для последовательной ветви

$$n = \frac{U}{U_{\kappa}}, \quad (23)$$

для параллельной

$$m = \frac{C}{C_{\kappa}}, \quad (24)$$

где U , U_{κ} – расчетные значения напряжения сети и конденсатора, В; C , C_{κ} – расчетная емкость УКПК и отдельно конденсатора, мкФ.

Получены уравнения для оценки любой схемы соединения батареи УКПК. Например, уравнения стоимости конденсаторов для схем «звезда» и «треугольник» имеют вид:

- «звезда»

$$3_Y = 12(maC + nbU), \quad (25)$$

- «треугольник»

$$3_{\Delta} = 12\left(\frac{m}{3}aC + 1,7nbU\right). \quad (26)$$

В уравнениях для сравниваемых схем не учитывается стоимость диодов и шунтирующих резисторов.

Условие экономической эффективности схемы «треугольник» определяется очевидным неравенством

$$3_{\Delta} - 3_Y < 0. \quad (27)$$

Подставим сюда уравнения (26), (25) и получим искомое условие

$$0,33maC_i + 1,7nbU_i - maC_i - nbU_i < 0. \quad (28)$$

Из справочных данных выбираем C_k и U_k конденсаторов, которые обеспечивают требуемые параметры компенсирующего устройства. По этим же данным определяем удельные значения a и b . Тогда по неравенству (28) находим предпочтительность схемы «треугольник» по стоимости конденсаторов. Такой расчет удобно использовать, например, для танталовых конденсаторов, у которых небольшие величины номинальных значений напряжения и требуется комплектовать сложные схемы УКПК.

Выбор места включения. Для анализа влияния места включения УКПК на снижение потерь в линии рассматриваем различные схемы сети. Общий случай показан на рисунке 3.

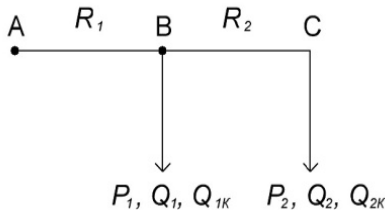


Рисунок 3 – Расчетная схема линии

Потери мощности в такой линии складываются из потерь на участках BC и AB:

$$\Delta P_2 = \Delta P_{BC} = \left[P_2^2 + (Q_2 - Q_{2к})^2 \right] \frac{R_2}{U}, \quad (29)$$

$$\Delta P_2 = \Delta P_{AB} = \left[(P_1 + P_2)^2 + (Q_1 - Q_{1к})^2 + (Q_2 - Q_{2к})^2 \right] \frac{R_1}{U}, \quad (30)$$

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2, \quad (31)$$

где P_1, P_2 – активная мощность нагрузок, $кВт$; Q_1, Q_2 – индуктивная мощность нагрузок, $кВар$; $Q_{1к}, Q_{2к}$ – мощность конденсаторов, $кВар$.

В работе с помощью векторных диаграмм приведено сравнение пяти вариантов включения конденсаторов (таблица 3.).

Таблица 3 – Потери от реактивной мощности

Место включения (способ компенсации)	Режим компенсации	Потери от реактивной мощности		
		на участке R_2	на участке R_1	суммарные
1. Точки b и c индивидуальной	Нормальная компенсация	$P_2 = 0$	$P_1 = 0$	$P = 0$
2. Точка c групповой	Нормальная компенсация	$P_2 = 0$	$\delta P_1 \neq 0$	$\delta P \neq 0$
3. Точка c групповой	Перекомпенсация	$\delta P_2 \neq 0$	$P_1 = 0$	$\delta P \neq 0$
4. Точка b групповой	Нормальная компенсация	$\delta P_2 \neq 0$	$\delta P_1 \neq 0$	$\delta P \neq 0$
5. Точка b групповой	Перекомпенсация	$\delta P_2 \neq 0$	$\delta P_1 \neq 0$	$\delta P \neq 0$

Таким образом, по энергетическому критерию самая эффективная компенсация достигается при включении УКПК для каждой нагрузки, то есть при индивидуальном способе компенсации.

В заключении главы приведены схемы управления УКПК. Показано, что серия полярных конденсаторов благодаря малым габаритам открывает широкую перспективу индивидуальной компенсации реактивной мощности, так как удается размещать УКПК на вводной коробке асинхронного двигателя либо встраивать в коробку магнитного пускателя.

В третьей главе «Экспериментальные исследования устройства компенсации реактивной мощности полярными конденсаторами» приведено описание экспериментальных установок и полученных данных.

Программа испытаний включала проверку функционирования полярных конденсаторов в однофазном режиме, проверку компенсации реактивной мощности в трехфазном режиме при разной загрузке электроприемника и различном значении действующего напряжения, а также исследование параметров АД при динамической компенсации в момент пуска.

На первом этапе использовали конденсаторы В43858 (К50-35) и диоды 1N5408 (ДО-27), включенные по схеме, представленной на рисунке 1, а. С помощью осциллографа и приборов установлено, что в цепи такого конденсатора протекает однополярный ток разного направления. Результирующий ток опережает ток нагрузки на 90° , электрические кривые токов и напряжений имеют синусоидальную форму.

Для проверки компенсации реактивной энергии собрано и присоединено к асинхронному двигателю устройство компенсации на полярных конденсаторах (УКПК). Аппараты выбраны по методике, изложенной в главе 2. Их параметры приведены в таблице 4.

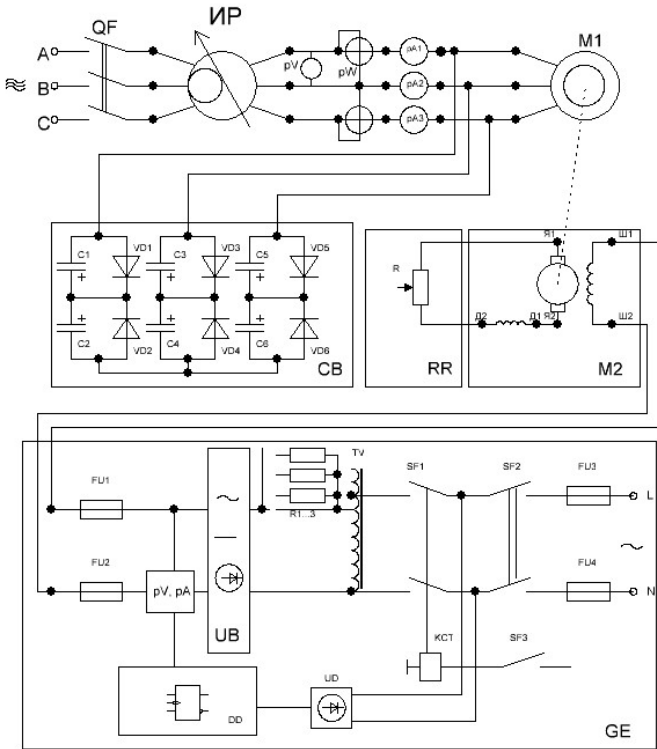


Рисунок 4 – Схема экспериментальной установки: A, B, C – фазы питающей сети $0,38 \text{ кВ}$; QF – автоматический выключатель; $ИР$ – индукционный регулятор; pA, pV, pW – соответственно амперметр, вольтметр, ваттметр; CB – устройство компенсации полярными конденсаторами; RR – водяной нагрузочный реостат; $M1$ – асинхронный электродвигатель (потребитель реактивной мощности); $M2$ – двигатель постоянного тока, включенного в режиме генератора; GE – возбудитель генератора; $FU1...FU4$ – плавкие предохранители; UB – переключатель режима работы канала напряжения; $R1...3$ – магазин сопротивлений; TV – латр; $SF1...3$ – автоматические выключатели вторичных цепей; KCT – реле отключения питания; UD – блок питания; DD – микропроцессорный контроллер

Таблица 4 – Элементы устройства компенсации реактивной мощности

Обозначение	Наименование элемента	Маркировка
$C1, C2, C3, C4, C5, C6$	Полярный конденсатор	M43858 (K50-35) U 450В, U_{AC} 600В, I_{AC} 1.56А, T 105 ⁰ С, C 33 мкФ
$VD1, VD2, VD3, VD4, VD5, VD6$	Выпрямительный диод	1N5408 (DO-27) U 1000В, I 3А, T 150 ⁰ С

Кроме физической модели, для исследования возможности применения полярных конденсаторов в качестве динамической компенсации, рассмотренной в работах И. И. Артюховым и С. Ф. Степановым, разработаны имитационные виртуальные математические модели на базе программного комплекса MATLAB-SIMULINK (рисунок 5), позволяющие исследовать электротехнические процессы при запуске АД как от сети, так и от резервных источников питания.

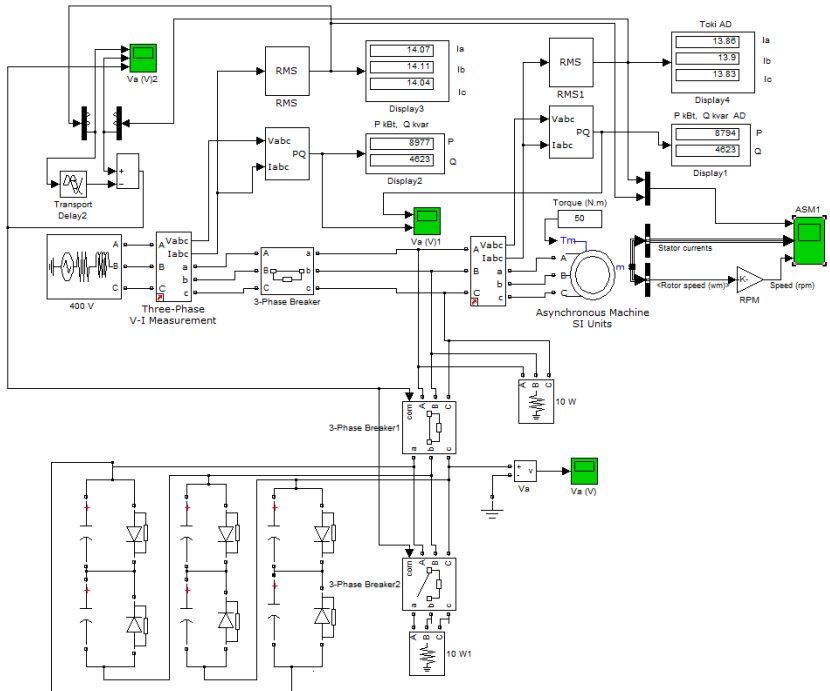


Рисунок 5 – Имитационная математическая модель электротехнического комплекса с устройством динамической компенсации пусковых токов АД в программе MATLAB-SIMULINK

(400 V – источник напряжения с активным-индуктивным внутренним сопротивлением; 1Mv – активная нагрузка; AMS 7500 VАНP– 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; 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 активными-индуктивными параметрами; Блоки RMS - осуществляют вычисление действующих значений различных величин)

Для полного изучения закономерностей компенсации реактивной энергии полярными конденсаторами эксперимент выполнен в широком диапазоне исходных данных:

- нагрузка двигателя принимала разные значения: холостой ход $\beta_1 = P/P_n = 0$; частичная нагрузка $\beta_2 = 0,75$; полная нагрузка $\beta_3 = 0,95$;
- напряжение питающей сети ($U_1 = 360 \dots 420 \text{ В}$);
- режим с отсутствием компенсации $C_1 = 0$ и с расчетной компенсацией $C_2 = 33 \text{ мкФ}$;
- предусматривались трёхкратная повторность опытов и контроль температуры конденсаторов и диодов.

Зависимость $\cos \varphi$ от напряжения и применения устройства компенсации показано на рисунке б.

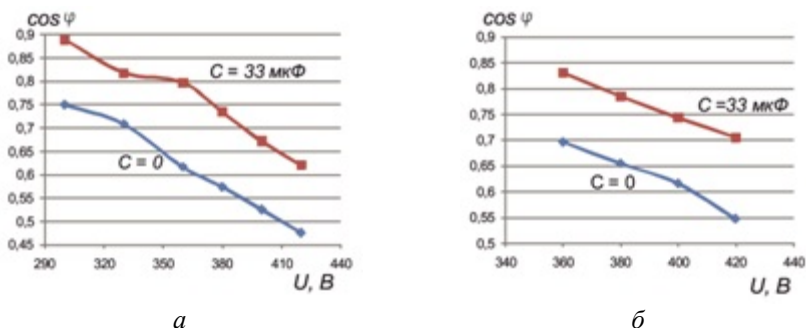


Рисунок б – Изменение коэффициента мощности ($\cos \varphi$) с использованием УКПК:
а – при $\beta=0,75$; б – при $\beta=0,95$

Энергетический эффект компенсации сразу обнаружился по резкому снижению тока, потребляемого двигателем. Например, при номинальном напряжении за счет подключения конденсаторов на холостом ходу ток уменьшился в 1,58 раза, а при номинальной нагрузке в 1,2 раза. При повышенном напряжении снижение возрастало. При всех исходных данных $\cos \varphi$ повышается в 1,2...1,3 раза.

В четвертой главе «Анализ результатов эксперимента» приводится обработка полученных экспериментальных данных повышения $\cos \varphi$, особенности нагревостойкости полярных конденсаторов и режимов включения УКПК в работу.

Статистической обработкой экспериментальных данных определили среднее значение, дисперсию и доверительный интервал коэффициента мощности ($\cos \varphi$) для всего плана эксперимента. Для номинального режима среднее исходное значение без компенсации и с компенсацией составляет соответственно $\cos \varphi_n = 0,63$ и $\cos \varphi_k = 0,77$. Для этих же условий доверительный интервал достигнутого коэффициента мощности равен 0,73...0,82 (при вероятности $P_\theta = 0,95$ и коэффициенте Стьюдента $\alpha = 2,75$).

Теоретические положения о применении полярных конденсаторов для компенсации реактивной мощности путем сопоставления расчетного (по уравнениям 2 и 3) и экспериментального $\cos\varphi$. Результаты представлены на рисунке 7 подтверждают расхождения на уровне 1,8...3,7%. Это соответствует инженерной точности расчета и свидетельствует о совпадении теоретических и экспериментальных результатов.

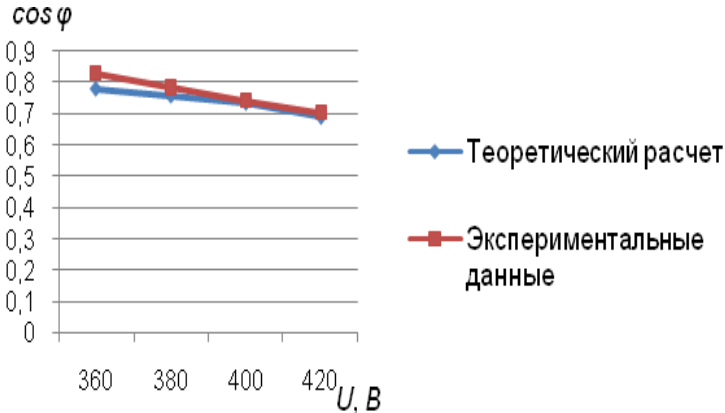


Рисунок 7 – Экспериментальные и расчетные значения $\cos\varphi$

Анализ результатов эксперимента показал, что полярные конденсаторы имеют малую постоянную времени нагрева (рисунок 8), которая в среднем составляет 9...11 мин.

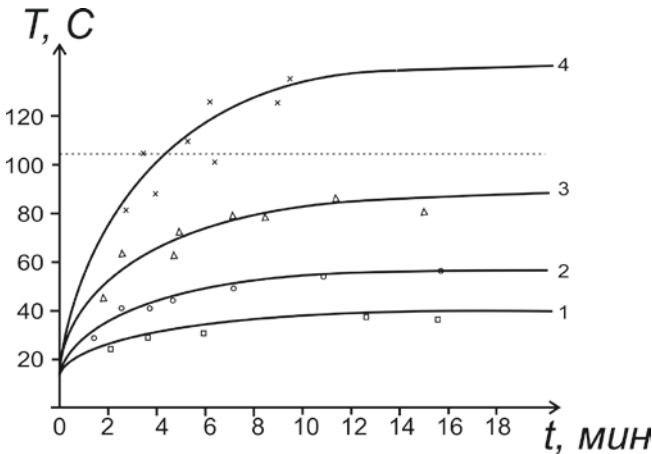


Рисунок 8 – Зависимость температуры конденсатора от продолжительности его работы (1 – напряжение на зажимах УКПК 100 В; 2 – 150 В; 3 – 200 В; 4 – 220 В)

Учитывая большую термическую чувствительность полярных конденсаторов, установлено требование к выбору напряжения для УКПК.

Для электродвигателей:

- кратковременный режим работы;
- повторно-кратковременный режим работы (рис. 9, б);
- режим динамической компенсации на момент пуска АД.

Выбор напряжения необходимо осуществлять, исходя из технических параметров.

При длительном режиме (рис. 9, а) работы необходимо предусматривать запас по напряжению в 2 раза.

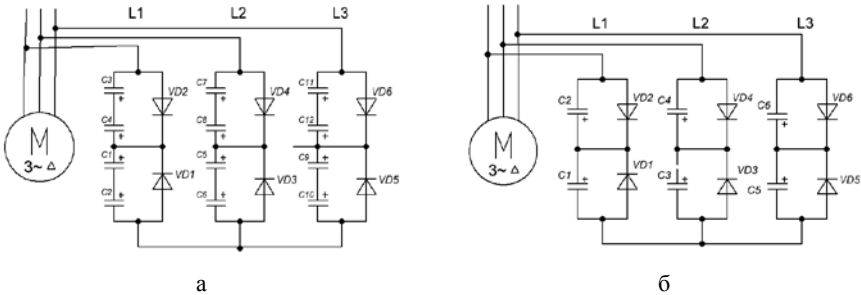


Рисунок 9 - Пример подключения УПК в соответствии с режимом работы электродвигателя: а) режим S1; б) режим S3

При динамической компенсации в момент пуска АД использование УПК дает ряд эффектов по сохранению качества электроэнергии. Результаты измерений виртуальной математической модели электротехнического комплекса с устройством компенсации пусковых реактивных токов показаны на рисунке 10.

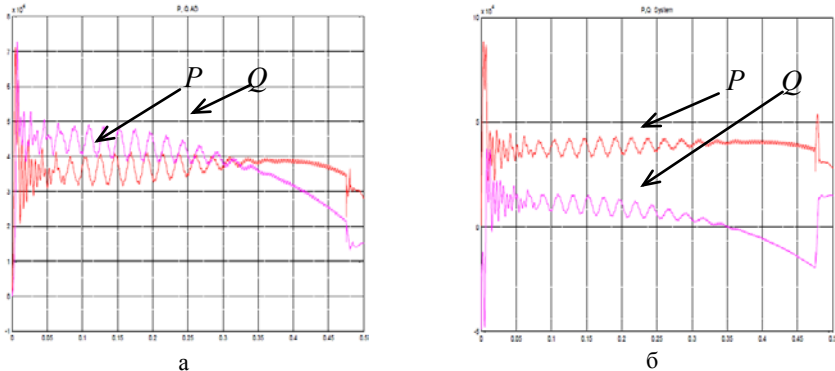


Рисунок 10 – Графики активных P и реактивных Q мощностей а) без компенсации; б) с компенсацией с помощью УПК

В целом, анализ графиков пусковых токов АД показал, что основу пускового тока составляет реактивный ток. Поэтому подключение УПК в режиме динамической компенсации дает ряд преимуществ, не только при

работе в сети, но и для резервных источников питания, тем самым снижая токовую нагрузку резервных дизельных электростанций.

В пятой главе «Оценка экономической эффективности» определены затраты на УКПК и стоимость сэкономленной электроэнергии. При использовании УКПК в сети 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 при годовых эксплуатационных затратах на обслуживание 23466 руб., что способствует снижению потерь электроэнергии на 9,8 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Сельские электрические сети напряжением до 1000 В имеют нестабильные характеристики. Длина линии изменяется от 250 до 900 м, мощность – от 8 до 32 кВт, сечение проводов – от 16 до 70 мм, 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 линии 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 электроэнергии (отклонение частоты, провал напряжения, отклонение напряжения) в пределах нормируемых значений.

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 %.

Рекомендации производству

1. Разработанное УКПК может быть использовано в сельскохозяйственных предприятиях, в комбинированных системах компенсации реактивной мощности, у которых электроприемниками являются асинхронные двигатели мощностью до 10 кВт.

2. Методика подбора полярных конденсаторов может быть использована для их выбора эксплуатационными службами, которые эксплуатируют асинхронные двигатели.

Перспективы дальнейшей разработки темы

1. Подготовить к серийному производству УКПК с последующей установкой в сетях длиной более 500 м.

2. Разработать схемы применения УКПК, позволяющие увеличить число часов использования конденсаторов.

3. Провести серию экспериментов по оценке эффективности использования УКПК на резервных источниках питания в сельских электрических системах.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

В рецензируемых научных изданиях:

1. **Зиниев, Ш.З.** Требования к средствам компенсации реактивной мощности / Г.П. Ерошенко, Ш.З.Зиниев // Научное обозрение. – 2013.–Вып.1. – С. 73 – 75.

2. **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.

3. **Зиниев, Ш.З.** Выбор места включения конденсаторных установок/ Г. П. Ерошенко, Ш.З.Зиниев // Научное обозрение. – 2015. – Вып.3. – С. 49.

4. Пат. 158228 Российская Федерация, МПК H02J 3/18. Устройство целевой компенсации реактивной мощности / Зиниев Ш.З., Ерошенко Г.П., Бакиров С.М. и др.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова» (RU). – №2015109546/07; заявл. 18.03.2015; опубл.02.12.2015, Бюл. № 36. – 4 с.

В других изданиях:

5. **Зиниев, Ш.З.** Экономия электроэнергии в сельскохозяйственных асинхронных приводах за счет плавной индивидуальной компенсации реактивной мощности / Ш.З.Зиниев // ВЕСТНИК №1. – Грозный:ФГБОУ ВПО «Чеченский государственный университет», 2013. –С. 143–145.

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

7. **Зиниев, Ш.З.** Обоснование объекта исследования при снижении потерь электрической энергии в сельскохозяйственных сетях / Ш.З. Зиниев // ВЕСТНИК №1. –Грозный: ФГБОУ ВПО «Чеченский государственный университет», 2014. – С. 56 – 58.

8. **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 «Грозненский государственный нефтяной технический университет им. акад. М.Д. Миллионщикова», 24 – 26 октября 2014 г. – С. 38 – 40.

9. **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 «Грозненский государственный нефтяной технический им. акад. М.Д. Миллионщикова», 2014 г. – С. 105 – 107.

10. **Зиниев, Ш.З.** Технические решения по повышению коэффициента мощности асинхронных двигателей / Ш.З. Зиниев // Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы VI Международной науч.-практ. конф. –Саратов: ФГБОУ ВПО «Саратовский ГАУ», Изд-во «Наука», 2015. – С. 64.

11. **Зиниев, Ш.З.** Экспериментальная установка для испытания полярных конденсаторов в схемах компенсации реактивной мощности / Г.П.Ерошенко, С.М.Бакиров, Ш.З. Зиниев // Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы VI Международной науч.-практ. конф. – Саратов: ФГБОУ ВПО «Саратовский ГАУ», Изд-во «Наука», 2015. – С. 50 – 53.