

005017089

На правах рукописи

Юрты

Юртаев Сергей Николаевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СРЕДСТВ
КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ НА
ПРЕДПРИЯТИЯХ СО СПЕЦИФИЧЕСКИМИ
ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКАМИ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

10 МАЯ 2012

Нижний Новгород- 2012

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО "Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева" (НГТУ)

- Научный руководитель: заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор
Вагин Геннадий Яковлевич
- Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Герман Леонид Абрамович,
ФГБОУ ВПО "Московский государственный
университет путей сообщения", профессор
- кандидат технических наук
Шалаев Сергей Алексеевич,
ООО "Региональная экспертная компания",
председатель
- Ведущая организация: ООО "Электротехстрой - Проект" г. Нижний
Новгород

Защита состоится **"25" мая 2012 г.** в **14** часов, в аудитории № **1258** на заседании диссертационного совета Д 212.165.02 при Нижегородском государственном техническом университете им. Р.Е. Алексеева по адресу: 603950 г. Н. Новгород, ул. Минина, д. 24, корпус 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева.

Автореферат разослан **"24" апреля 2012 г.**

Ученый секретарь
диссертационного совета



В.В. Соколов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Актуальность темы. Многие промышленные потребители электроэнергии наряду с потреблением активной мощности потребляют и реактивную мощность (РМ). Передача РМ от электростанций к потребителям по электрическим сетям приводит к дополнительным потерям активной мощности. Эти дополнительные потери могут быть уменьшены, если разгрузить сети от передачи реактивной мощности.

Потери в электрических сетях быстро растут с понижением $\cos \varphi$. При $\cos \varphi = 0,5$ они достигают 40 %. Согласно расчетам повышение средневзвешенного $\cos \varphi$ в целом по России на 0,01 позволяет ежегодно экономить около 1 млрд. кВт·ч электроэнергии. Кроме этого такое повышение $\cos \varphi$ позволяет высвободить 150 тыс. кВт мощности генераторов электрических станций.

Наряду с потерями активной мощности, реактивная мощность оказывает большое влияние на устойчивость энергетических систем. Дефицит РМ может привести к крупным авариям на подстанциях в энергосистемах. С помощью источников РМ можно так же улучшать качество электроэнергии у потребителей.

Решению проблемы компенсации РМ на промышленных предприятиях посвящено большое число публикаций, как в нашей стране, так и за рубежом. Среди них можно отметить работы Абрамовича Б.Н., Вагина Г.Я., Вахниной В.В., Воротницкого В.Э., Германа Л.А., Глушкова В.М, Грибина В.П., Добрусина Л.А., Еремина О.И., Жежеленко И.В., Железко Ю.С., Зорина В.В., Карпова Ф.Ф., Ковалева И.Н., Корнилова Г.П., Кузнецова А.В., Лоскутова А.Б., Мельникова Н.А., Салтыкова В.М., и многих других.

Однако, несмотря на большую актуальность проблемы компенсации реактивной мощности на промышленных предприятиях, она решается очень медленно, ввиду появления большого количества специфических электроприемников (с резко-переменным режимом работы и нелинейными вольт-амперными характеристиками), устаревшей нормативной базой (она была разработана в 1986 г. и не пересматривалась), появлением большого количества новых источников реактивной мощности и отсутствием четких рекомендаций по их выбору и области применения. Решению этих вопросов и посвящена настоящая диссертация.

Объект исследования – системы электроснабжения и электроприемники промышленных предприятий.

Предмет исследования – источники реактивной мощности, их выбор и оптимальное размещение.

Цель работы – разработка критериев, способов, алгоритмов и методов, направленных на повышение эффективности компенсации РМ на промышленных предприятиях со специфическими электроприемниками.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели в диссертации решаются следующие научные и практические задачи:

1. Анализ и исследование потребителей реактивной мощности.

2. Анализ и исследование области применения перспективных источников реактивной мощности.

3. Разработка оптимальных способов компенсации реактивной мощности в электрических сетях промышленных предприятий напряжением до и выше 1000 В.

4. Разработка методики выбора оптимальных фильтро-компенсирующих устройств на предприятиях со специфическими электроприемниками.

5. Разработка компьютерных моделей узлов нагрузки со специфическими электроприемниками для расчета высших гармоник, интергармоник и выбора фильтро-компенсирующих устройств.

Связь работы с научными программами. Работа выполнялась в рамках Государственного контракта № 16.526.12.6016 на выполнение опытно-конструкторских работ в рамках Федеральной целевой программы "Исследование и разработка по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2007-2013 г."

Методы научных исследований. Для решения поставленных задач использовались методы экономического, корреляционного и спектрального анализа, а так же компьютерного моделирования.

Научная новизна работы.

1. Разработаны основные положения компенсации реактивной мощности в современных условиях кардинального изменения стоимостных показателей электрооборудования и потерь электроэнергии, отличающиеся тем, что:

- в сетях 0,4 кВ предлагается полная компенсация реактивной мощности в соответствии с проведенными исследованиями;
- уточнены способы компенсации реактивной мощности на шинах 6 (10) кВ, а именно, на действующих предприятиях выгодно применять СД с частотой вращения более 1000 об./мин. и мощностью более 1000 кВт, а на вновь проектируемых предприятиях оптимальным вариантом является установка конденсаторных батарей;
- учтены интергармоники, создаваемые специфическими электроприемниками.

2. Проведенные исследования существующих и перспективных источников реактивной мощности для промышленных предприятий со специфическими электроприемниками, с рассмотрением удельных потерь мощности, сравнительных удельных стоимостных характеристик и области их предпочтительного применения, позволяют выбирать на первой стадии проектирования оптимальные варианты компенсации реактивной мощности.

3. Для промышленных предприятий со специфическими электроприемниками, имеющими нелинейные вольтамперные характеристики, обоснована новая методика расчета компенсации РМ с применением узкополосных и широкополосных фильтров, в которой:

- определен порядок расчета количества фильтров;
- определены резонансные частоты фильтров;

- определены мощности фильтров;
- приводится расчет остаточного напряжения n-ой гармоники после включения фильтра;
- рекомендуется при больших мощностях конденсаторных батарей и наличии интергармоник применять широкополосные фильтры второго порядка и фильтры С типа.

Практическая ценность результатов работы.

1. Предложенные критерии и методы выбора различных источников реактивной мощности, с учетом новых разработок, позволяют выбирать оптимальные типы компенсирующих устройств и значительно снизить потери электроэнергии в элементах систем электроснабжения промышленных предприятий.

2. Разработанные компьютерные модели узлов нагрузки с мощными дугowymi печами, с учетом статических компенсаторов, позволяют определять уровни несинусоидальности в точках присоединения предприятия к электроснабжающим организациям, а также выбирать и оптимизировать параметры фильтро-компенсирующих устройств.

3. Разработана инженерная методика расчета и выбора параметров различных компенсаторов РМ, позволяющая решать в комплексе проблему компенсации РМ и повышения качества электроэнергии на предприятиях со специфическими электроприемниками.

Достоверность полученных результатов подтверждается результатами компьютерного моделирования и хорошей сходимостью результатов моделирования с экспериментальными данными.

Реализация результатов работы. Результаты работы использованы:

1. При проведении энергоаудитов 12 промышленных предприятий с экономическим эффектом 24 млн. руб. в год.

2. При проведении энергоаудитов 3-х электросетевых организаций с экономическим эффектом 10 млн. руб. в год.

3. Теоретические результаты диссертационной работы используются в учебном процессе Нижегородского государственного технического университета при чтении лекций по курсу “Оптимизация систем электроснабжения”, а также в курсовом и дипломном проектировании.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Анализ потребления реактивной мощности различными электроприемниками промышленных предприятий.

2. Анализ перспективных источников реактивной мощности и рекомендации по области их применения.

3. Уточненная методика компенсации реактивной мощности в электрических сетях промышленных предприятий напряжением до и выше 1000 В при наличии специфических электроприемников.

4. Компьютерные модели узлов нагрузки с дугowymi печами для расчета высших гармоник, интергармоник и выбора фильтро-компенсирующих устройств.

Апробация результатов работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на: VII, VIII, IX, XI Международной молодежной научно-технической конференции “Будущее технической науки” НГТУ им. Р.Е. Алексеева Н. Новгород 2008, 2009, 2010, 2012 гг.; XIII и XIV Нижегородской сессии молодых ученых (технические науки) Н. Новгород 2008, 2009 гг.; Научно-технической конференции “Актуальные проблемы электроэнергетики” НГТУ им. Р.Е. Алексеева Н. Новгород 2008, 2009, 2010, 2011 гг.; Всероссийской научно-практической конференции с международным участием “Повышение эффективности электрического хозяйства потребителей в условиях ресурсных ограничений”, МЭИ, Москва 2009 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 работ, 4 из них в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ, и 1 статья за рубежом.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников из 178 наименований, 1 приложения и содержит 198 страниц основного текста.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель работы, основные задачи исследования, научная новизна и практическая значимость.

В первой главе дан аналитический обзор текущего состояния вопроса компенсации реактивной мощности на промышленных предприятиях.

Показано, что отчетные потери электроэнергии в целом по России составляют около 14 %. В структуре технических потерь 78% составляют потери в сетях 110 кВ и ниже. Около половины этих потерь составляют потери в системах электроснабжения промышленных предприятий. Одним из наиболее эффективных технических мероприятий по снижению потерь является компенсация реактивной мощности.

Проведено исследование потребления реактивной мощности основными группами потребителей промышленных предприятий, проанализированы факторы влияющие на потребление РМ и даны рекомендации по снижению потребления РМ. Особое внимание уделено электротехнологическим установкам, которые являются специфическими электроприемниками.

Выполненный обзор работ по теме диссертации показал, что нормативные документы по компенсации реактивной мощности на промышленных предприятиях, разработанные в 1986 г., устарели и не отвечают рыночным отношениям. Установлено, что появилось большое количество специфических электроприемников (с нелинейными вольт-амперными характеристиками, импульсным и резкопеременным режимами работы) это требует новых подходов к выбору компенсаторов реактивной мощности. Показано, что наряду с высшими гармониками большое количество электроприемников генерируют интергармоники, которые, в соответствии с ГОСТ Р 51317.2.4-2000, также надо учитывать при компенсации реактивной мощности. С ликвидацией мартеновского способа выплавки стали на промышленных предприятиях появились очень мощные дуговые печи (до 150 МВ·А). Эти печи имеют низкий

cos φ (порядка 0,7), создают высокий уровень гармоник и колебаний напряжения. Это требует разработки методов выбора динамических компенсаторов РМ.

Вторая глава посвящена выбору оптимальной степени и способов компенсации РМ в сетях до и выше 1000 В промышленных предприятий при отсутствии специфических электроприемников с учетом изменения стоимостных показателей.

Установлено, что основная масса потребителей РМ на промышленных предприятиях находится в сетях до 1000 В (до 90%). Поэтому важной проблемой для таких сетей является определение оптимальной, с экономической точки зрения, степени компенсации реактивной мощности.

Путем минимизации функции приведенных затрат на передачу РМ из сетей напряжением выше 1000 В в сети напряжением до 1000 В, с применением критериев подобия, получено выражение общих затрат на передачу РМ в сеть напряжением до 1000 В.

$$z = \frac{0,96 \cdot C_T \cdot P_P}{k_3 \cdot S_{T,НОМ}} + Q_T \cdot \left(\frac{0,396 \cdot C_T}{k_3 \cdot S_{T,НОМ}} + z_{КВ} - z_{КН} \right) + (z_{КН} \cdot Q_P - z_{КВ} \cdot Q_Э); \quad (1)$$

$$C_T = \Delta P_{КЗ} \cdot k_3^2 \cdot z_Э + z_{КВ} \cdot k_3^2 \cdot \Delta Q_{КЗ} + z_{КВ} \cdot \Delta Q_{ХХ} + z_T + \Delta P_{ХХ} \cdot z_{ЭХ}, \quad (2)$$

где $\Delta P_{КЗ}$, $\Delta P_{ХХ}$ – номинальные значения потерь активной мощности в трансформаторах при коротком замыкании и холостом ходе соответственно, кВт; $S_{T,НОМ}$ – номинальная мощность трансформатора, кВ.А; P_P – расчетная активная мощность нагрузки, кВт; Q_T – реактивная мощность передаваемая в сеть 0,4 кВ из сети 6-10 кВ, квар; z_3 , $z_{ЭХ}$ – стоимость 1 кВт нагрузочных потерь и потерь холостого хода трансформаторов в год, руб/кВт; z_T – составляющая приведенных затрат трансформатора, руб; $z_{КН}$, $z_{КВ}$ – удельные приведенные затраты на конденсаторы напряжением до и выше 1000 В, руб/квар; Q_P – реактивная мощность нагрузки, квар; $Q_{КВ}$ – мощность конденсаторных батарей 6(10) кВ; $Q_Э$ – значение реактивной мощности, которое устанавливает энергосистема, квар.

Выражение (1) линейно зависит от передаваемой в сеть до 1000 В реактивной мощности Q_T , что и определяет минимальное значение затрат при $Q_T=0$. Таким образом установлено, что вне зависимости от стоимостных показателей значение коэффициента реактивной мощности в электрических сетях напряжением до 1000 В может приниматься равным $\tan \varphi=0$.

Для доказательства этого утверждения в диссертации проведены расчеты затрат вариантов полной и частичной компенсации реактивной мощности для конкретных цехов промышленного предприятия. Расчет проведен для магистральных и радиальных схем электроснабжения для двух типов мощностей цеховых трансформаторов 1000 и 2500 кВ·А и 12 вариантов расчетной нагрузки цехов.

Расчеты были проведены при следующих допущениях:

1. При полной компенсации РМ получается минимальное количество трансформаторов $N_{T,мин}$.

$$N_{T.мин} = \frac{P_p}{k_{з.т} \cdot S_{T.ном}} + \Delta N, \quad (3)$$

где ΔN – добавка до ближайшего целого числа; P_p – расчетная активная мощность цеха, кВт; $k_{з.т}$ – коэффициент загрузки трансформаторов; $S_{T.ном}$ – номинальная мощность цеховых трансформаторов, кВ.А.

2. При полной компенсации, кроме экономии на трансформаторах, сокращается число ячеек на питающем распределительном пункте и сокращается число высоковольтных кабелей до цеха. Но при этом увеличивается мощность конденсаторных батарей.

Расчетные затраты при частичной и полной компенсации определялись по выражениям:

$$Z_{ч.к} = E \left(mK_T + n_1 K_{яч} + n_2 K_{кл} + \sum_{i=1}^{n_4} N_{КБ.чi} \cdot K_{КБi} \right) + C_{Г.чi}; \quad (4)$$

$$Z_{п.к} = E \sum_{i=1}^{n_4} N_{КБ.пi} \cdot K_{КБi} + C_{Г.пi}, \quad (5)$$

где E – суммарный коэффициент отчислений от капитальных затрат (8); K_T – стоимость трансформатора; $K_{яч}$ – стоимость ячеек 6 (10) кВ; $K_{КБi}$ – стоимость конденсаторных установок; n_1 – количество ячеек необходимых для подключения дополнительного числа трансформаторов m ; n_2 – количество кабельных линий необходимых для питания дополнительного числа трансформаторов m ; $C_{Г.чi}$ – стоимость годовых потерь.

Стоимость потерь C_G при частичной и полной компенсации определялась по выражениям:

$$C_{Г.ч} = (\Delta P_{кл} + \Delta P_T + \Delta P_{КБ.ч} + \Delta P_{СН}) \cdot C_{уэ} \tau_M; \quad (6)$$

$$C_{Г.п} = \Delta P_{КБ.п} \cdot C_{уэ} \tau_M; \quad (7)$$

где $\Delta P_{кл}$ – потери активной мощности в кабельных линиях, питающих дополнительное число трансформаторов m ; ΔP_T – потери мощности в дополнительном числе трансформаторов m ; $\Delta P_{КБ.ч}$, $\Delta P_{КБ.п}$ – потери мощности в конденсаторных установках, при частичной и полной компенсации соответственно; $C_{уэ}$ – удельная стоимость годовых потерь электроэнергии.

Суммарный коэффициент отчислений от капитальных затрат определялся по выражению:

$$E = r + p_a + p_0, \quad (8)$$

где r – реальная процентная ставка; p_a – норма амортизации; p_0 – коэффициент отчислений на текущий ремонт и обслуживание.

Результаты расчетов, приведенные в диссертации, подтверждают сделанный ранее вывод о целесообразности полной компенсации реактивной мощности в сетях до 1000 В промышленных предприятий при любых мощностях цеховых трансформаторов.

Проведен выбор оптимальных способов компенсации реактивной мощности в электрических сетях 6 (10) кВ промышленных предприятий без специфических электроприемников с учетом новых цен на конденсаторы, синхронные электродвигатели и электроэнергию. Основными источниками

реактивной мощности на подобных промышленных предприятиях являются конденсаторные установки и синхронные электродвигатели (СД).

Рассмотрено два варианта выбора источников реактивной мощности.

Действующее ПП. Синхронные электродвигатели установлены и необходимо определить какой вариант более оптимален: 1) использование СД с генерацией реактивной мощности; 2) установка конденсаторных батарей (КБ) в сети 6 (10) кВ.

Приведенные затраты на уже установленные СД и КБ

$$Z = z_1 \cdot Q + z_2 \cdot Q^2 \quad (9)$$

$$Z_{КБ} = E(K_0 + k_{уд} Q_{КБ}) + C_{Г} \Delta P_{удКБ} Q_{КБ}, \quad (10)$$

где Q – генерируемая СД реактивная мощность, z_1, z_2 – удельные затраты соответственно на 1 квар и 1 квар² генерируемой реактивной мощности; K_0 – стоимость вводной ячейки, $k_{уд}$ – удельная стоимость 1 квар КБ; $Q_{КБ}$ – мощность КБ; $C_{Г}$ – годовая стоимость потерь электроэнергии.; $\Delta P_{уд}$ – удельные потери активной мощности в КБ.

На рис. 1, а показаны полученные зависимости удельных затрат на генерацию РМ от номинальной мощности источников РМ различных типов: кривые 1-4 СД с синхронной частотой вращения n соответственно 250, 500, 750 и 1000 об./мин., 5 с $n=3000$ об./мин., 6 – нерегулируемые конденсаторные батареи.

Проектируемое ПП. Необходимо выбрать, какой вариант компенсации выгоден: 1) применение СД; 2) установка КБ в сети 6, 10 кВ промышленного предприятия.

Приведенные затраты на СД в данном варианте

$$Z = Z_0 + z_1 \cdot Q + z_2 \cdot Q^2, \quad (11)$$

где Z_0 – постоянная составляющая затрат на СД и регулятор возбуждения.

На рис. 1, б показаны полученные зависимости удельных затрат на генерацию реактивной мощности для проектируемого промышленного предприятия.

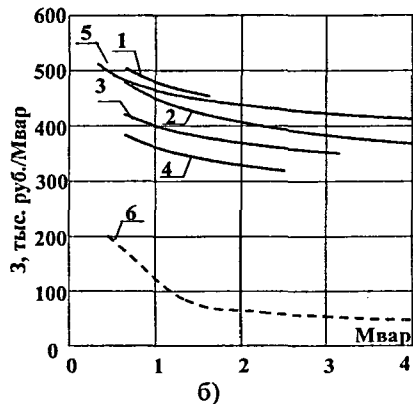
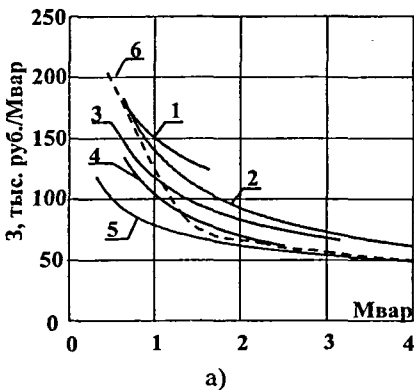


Рисунок 1 – Зависимости удельных затрат на генерацию реактивной мощности синхронными электродвигателями и конденсаторными батареями

Как видно из рис. 1, а на действующих предприятиях СД выгодно использовать для компенсации реактивной мощности, если их частота вращения более 1000 об./мин. и мощность более 1000 кВт. На вновь проектируемом промышленном предприятии (рис. 1, б) оптимальным вариантом компенсации реактивной мощности является применение в сетях 6 (10) кВ конденсаторных батарей.

Исследованию влияния специфических электроприемников на выбор источников реактивной мощности посвящена **третья глава диссертации.**

К группе специфических электроприемников на промышленном предприятии относятся электроприемники с нелинейными вольт-амперными характеристиками, с резкопеременным и импульсным режимами работы и однофазные электроприемники. Основными из них являются: дуговые печи, прокатные станы, электросварочные установки, преобразователи тока и частоты, газоразрядные источники света, компьютерная техника. Эти электроприемники имеют низкие значения $\cos \phi$ и одновременно влияют на качество электроэнергии. Поэтому задачу компенсации реактивной мощности при наличии таких электроприемников надо решать в комплексе с задачей повышения качества электроэнергии. Наибольшее влияние на выбор источников реактивной мощности оказывают электроприемники с нелинейными вольт-амперными характеристиками, так как конденсаторные батареи при наличии высших гармоник могут выходить из строя из-за перегрузки по току. В соответствии с ПУЭУ конденсаторные батареи без защиты в таких сетях можно применять, если выполняются следующие условия $S_{КЗ}/S_{НЛ} \geq 200$ при наличии преобразователей тока и частоты и $S_{КЗ}/S_{НЛ} \geq 100$ при других видах нелинейных нагрузок. Если эти условия не выполняются, то необходимо применять заградительные или поглощающие фильтры. Для их выбора необходимо определить коэффициенты несинусоидальности напряжения K_U в точках общего присоединения промышленных предприятий и электроснабжающей организации. В работе проведен анализ и исследование высших гармоник генерируемых различными специфическими электроприемниками.

Наибольшая сложность возникает при определении высших гармоник тока, генерируемых дуговыми печами. Это связано с тем, что графики их нагрузок имеют случайный характер, что приводит к случайному характеру высших гармоник. В работе разработана компьютерная модель дуговой печи с дугой переменного тока, позволяющая определять уровни гармоник тока, для любых режимов работы дуговых печей. Структурная схема разработанной компьютерной модели приведена в диссертации. Результаты сравнения высших гармоник, определенных по разработанной модели, и данных фирмы изготовителя дуговой печи с трансформатором мощностью 140 МВ·А, показали, что погрешность расчета не превышает $\pm 10\%$, что говорит об адекватности разработанной модели.

В работе приведен процентный состав высших гармоник, генерируемых дуговыми печами различной емкости, что позволяет упростить расчеты при проектировании.

Разработана компьютерная модель для расчета высших гармоник от импульсных преобразователей с однофазными выпрямителями, которые широко применяются на промышленных предприятиях (компьютерная техника, газоразрядные лампы, системы управления и защиты).

В стандартах МЭК и ГОСТ Р 51317-2.4-2000 наряду с высшими гармониками рекомендуют определять интергармоники. Это гармоники не кратные основной частоте 50 Гц. В стандарте МЭК-61000-2-1 рекомендуют учитывать интергармоники в диапазоне от 0 до 2000 Гц.

Интергармоники генерируют электроприемники, которые постоянно или кратковременно работают в переходном режиме. Это преобразователи частоты, асинхронные электродвигатели при некоторых режимах работы, дуговые печи и сварочные машины. В диссертации проведено исследование интергармоник, создаваемых дуговыми печами и сварочными установками. Приборов для исследования интергармоник в России не выпускается, поэтому в работе уровни интергармоник определялись путем гармонического анализа графика случайного процесса $I(t)$ или $U(t)$ огибающих кривых действующих значений тока и напряжения. Для этого было применено быстрое преобразование Фурье (БПФ). Такое разложение характеризует гармонический состав конкретной реализации случайного процесса на интервале стационарности.

Для исследования корреляционных функций и спектральных плотностей ДП и сварочных установок был применен пакет Signal Tolbox компьютерной системы Matlab, в котором предусмотрены процедуры для формирования импульсов различных форм.

В диссертации приведены графики нагрузки, спектральные и корреляционные функции дуговых печей емкостью 100 и 150 т, а также их амплитудные спектры. На рис. 2, для примера, приведен график спектральной плотности для печи емкостью 150 т, мощностью 95 МВ·А Оскольского металлургического комбината.

Анализ спектральных характеристик дуговой печи показал наличие в спектре интергармоник, они проявляются в диапазоне от 0 до 15 Гц и вызваны колебаниями токов дуги.

Эти колебания токов можно разделить на два вида: нерегулярные с частотой до 2 Гц и циклические с частотой от 2 до 15 Гц. Размеры циклических колебаний тока обычно не превышают 20 % номинального тока печной установки, но они оказывают большое влияние на освещение, так как их частота совпадает с максимальной чувствительностью глаза (8-12 Гц).

В диссертации приведены графики нагрузки, спектральные и корреляционные функции различных типов сварочных установок, а также их спектральные плотности. На рис. 3, для примера, приведены спектральные плотности напряжения шинопроводов питающих сварочные машины.

Анализ спектральных характеристик сварочных установок показывает, что частота интергармоник лежит в пределах от 0,1 до 5 Гц, а основная энергия спектра сосредоточена в диапазоне от 0,2 до 2 Гц.

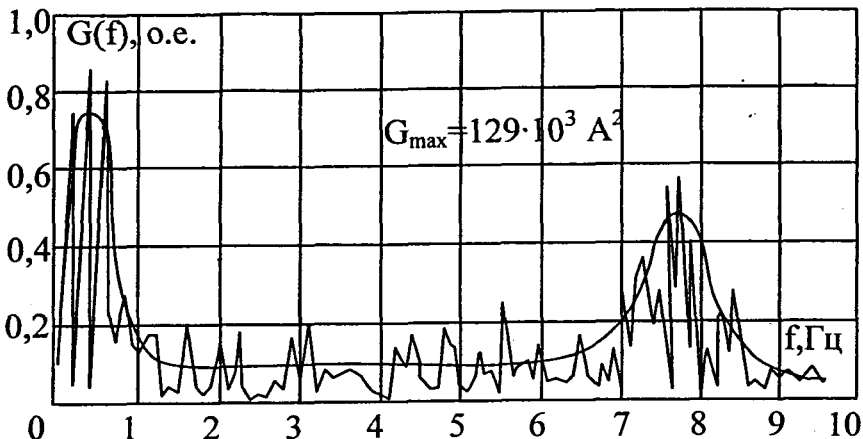


Рисунок 2 – График спектральной плотности дуговой печи емкостью 150 т

Данные исследования позволяют сделать вывод, что интергармоники, создаваемые сварочными машинами и дугowymi печами в диапазоне от 0 до 50 Гц, вызваны колебаниями тока, которые приводят к колебаниям напряжения и их можно снижать средствами, которые применяются для снижения колебаний напряжения.

Проведен анализ традиционных и перспективных компенсаторов реактивной мощности, и даны рекомендации по их применению на промышленных предприятиях со специфическими электроприемниками. Результаты анализа приведены в табл. 1.

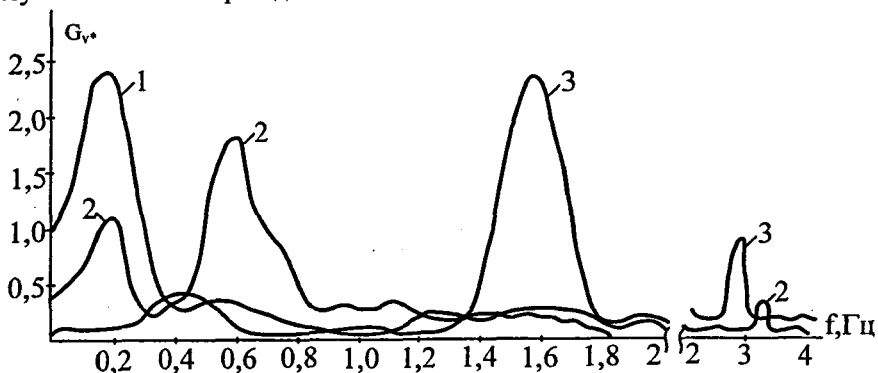


Рисунок 3 – Спектральные характеристики напряжения шинопроводов и подстанций питающих группы сварочных машин (1,2 стационарные машины различной мощности, 3 группа подвесных и одна многоточечная машина)

Таблица 1 – Области применения компенсаторов реактивной мощности на промышленных предприятиях (ПП)

Виды источников РМ	Область применения	Потери мощности Вт/квар	Сравнительные цены, руб./квар
Традиционные			
Конденсаторные батареи поперечного включения: до 1000 В 6 (10) кВ	Компенсация РМ при отсутствии электроприемников с нелинейными вольтамперными характеристиками	0,25-0,45 0,1-0,2	340-1000 180-810
Конденсаторные установки продольного включения	Компенсация РМ и снижение колебаний напряжения в сетях с электросварочными электроприемниками	0,5-1,0	800-1600
Синхронные электродвигатели	Компенсация РМ на промышленных предприятиях, где они применяются для привода электроприемников	7-50	3200-6800
Пассивные фильтры	Компенсация РМ и снижение высших гармоник на промышленных предприятиях с нелинейными электроприемниками со спокойным режимом работы	0,5-2,0	2000-4000
Перспективные			
Активные фильтры	Компенсация РМ, снижения высших гармоник, интергармоник, колебаний и провалов напряжения	не более 3 % от номинальной мощности	10000-14000
Гибридные фильтры	Компенсация РМ, снижения высших гармоник, интергармоник, колебаний и провалов напряжения	0,5-2,0	3000-6000
Статические тиристорные компенсаторы: прямой компенсации косвенной компенсации	Компенсация РМ, снижение высших гармоник, интергармоник и колебаний напряжения на промышленных предприятиях с дуговыми печами и прокатными станами	0,5-1 % от $S_{ном}$	6000-8000
		1-2 % от $S_{ном}$	8000-10000
Компенсаторы СТАТКОМ	Компенсация РМ, снижение высших гармоник, интергармоник, колебаний и провалов напряжения в сетях с импульсными и резкопеременными нагрузками.	не более 3 % от номинальной мощности	10000-15000
Корректоры коэффициента мощности	Компенсация РМ, снижение высших гармоник, интергармоник, колебаний и провалов напряжения в сетях с импульсными источниками питания, в преобразователях частоты, в электронной технике, в газоразрядных лампах	не более 3 % от номинальной мощности	10000-14000

Четвертая глава посвящена выбору оптимальных способов компенсации реактивной мощности в системах электроснабжения со специфическими электроприемниками.

Предложен следующий алгоритм выбора:

1. Определяется необходимая для предприятия мощность компенсирующих устройств

$$Q_{кв.п} \geq P_{рм} (\text{tg } \varphi_{фп} - \text{tg } \varphi_{мак}), \quad (12)$$

где $P_{рм}$ – расчетная активная нагрузка предприятия в период большой нагрузки электроснабжающей организации; $\text{tg } \varphi_{фп}$ – фактический коэффициент реактивной мощности предприятия в период большой нагрузки электроснабжающей организации; $\text{tg } \varphi_{мак}$ – коэффициент реактивной мощности, задаваемый электроснабжающей организацией.

2. Определяются уровни колебаний напряжения.

3. Определяются уровни высших гармоник и интергармоник, генерируемых специфическими электроприемниками.

4. Для всех специфических электроприемников выбираются оптимальные по техническим и экономическим критериям, средства компенсации РМ и обеспечения качества электроэнергии.

5. Определяется мощность компенсирующих устройств с учетом компенсации РМ специфических электроприемников:

$$Q_{кв.п.н} = Q_{кв.п} - \sum_{i=1}^n Q_{кв.сп.и}, \quad (13)$$

где $Q_{кв.сп.и}$ – реактивная мощность, которая скомпенсирована в i -ом специфическом электроприемнике; n – число специфических электроприемников.

6. Определяется мощность компенсирующих установок в сетях до 1000 В:

$$Q_{кв.н} \leq Q_{рм.ц}, \quad (14)$$

где $Q_{рм.ц}$ – расчетная реактивная мощность цеха на напряжение до 1000 В.

7. Определяется мощность конденсаторных установок в сетях 6 (10) кВ промышленных предприятий:

$$Q_{кв.в} = Q_{кв.п.н} - \sum_{i=1}^k Q_{кв.н} - \sum_{i=1}^m Q_{сд}, \quad (15)$$

где k – число цехов на промышленном предприятии; $Q_{сд}$ – реактивная мощность синхронных электродвигателей; m – число СД работающих с $\cos \varphi = 0,9$.

В диссертации даются критерии расчета и выбора параметров различных фильтров. С точки зрения максимального снижения потоков РМ и устранения высших гармоник фильтры целесообразно устанавливать около источников высших гармоник. Это особенно актуально для систем электроснабжения с источниками гармоник, которые генерируют различные по спектральному составу ВГ. Количество фильтров зависит от желаемой степени подавления ВГ и коэффициента $K_p = Q_{квф} / S_{кз}$. Мировой опыт показывает, что снижение

коэффициента искажения кривой напряжения надо проводить до норм, регламентированных в ГОСТах стран.

Выбор количества фильтров предлагается начинать с одного настроенного на частоту, близкую к резонансной или на частоту, наибольшую по току гармоники в спектре нелинейных электроприемников. Если при одном фильтре K_U будет больше $K_{УД}$, то выбирается еще один фильтр на следующую в спектре гармонику тока и т.д.

Для выбора резонансных частот, на которые должен настраиваться фильтр предлагается сначала определить резонансные частоты контура емкость КБ и индуктивное сопротивление электрической сети в точке подключения фильтра:

$$f_p = \sqrt{S_{K3} / Q_{KB}} \quad (16)$$

Используя (16) в диссертации определены предельные мощности КБ, которые могут вызвать резонанс на различных гармониках:

$$Q_{KB.PP} = S_{K3} / f_p^2 \quad (17)$$

Мощность КБ фильтра определяется по выражению:

$$Q_{KB \Phi} \geq 1,2 K_{CX} U_{KB \text{ ном}} I_{\Sigma ni} \quad (18)$$

где K_{CX} – коэффициент схемы соединения КБ ($K_{CX}=3$ при соединении КБ в звезду, $K_{CX}=\sqrt{3}$ при соединении КБ в треугольник); $I_{\Sigma ni}$ – действующее значение гармоник тока, протекающих через фильтр p_p – гармоники.

Для узкополосного фильтра, который предназначен для снижения только ВГ, $I_{\Sigma ni}$ равен току p_i резонансной гармонике I_{ni} :

$$I_{\Sigma ni} = I_{ni} \quad (19)$$

Если фильтр предназначен для компенсации РМ и снижения ВГ, то полученная по (18) мощность проверяется по условию:

$$Q_{KB \Phi} \geq Q_{KV}, \quad (20)$$

где Q_{KV} – необходимая мощность КБ по условию компенсации РМ.

Если условие (20) не выполняется, то мощность КБ фильтра надо принять равной Q_{KV} .

Для сокращения количества резонансных фильтров предлагается применять широкополосные фильтры. Это особенно актуально при большой мощности КБ и наличии интергармоник. При наличии широкополосного фильтра p_p – через него будут проходить кроме тока I_{pp} , часть токов других гармоник I_{ni} . Относительная доля тока p_i гармоники I_{ni} , проходящая через фильтр, будет определяться по выражению (21), где $p_i^* = p_i / p_p$.

$$\sigma_{p_i} = \frac{1}{\frac{1}{k_p \cdot n_p^2} (1 - p_i^{*2}) + 1} \quad (21)$$

Установлено, что при $K_p > 1,5 \cdot 10^{-2}$ довести K_U до требований стандартов можно с помощью одного фильтра. При $K_p > 2 \cdot 10^{-2}$ можно обойтись одним фильтром 5-й гармоники в сетях с 6-ти пульсными выпрямителями и одним фильтром 11-й гармоники в сетях с 12-ти пульсными выпрямителями.

Относительное остаточное напряжение n_{i-x} гармоник после установки широкополосного фильтра предлагается определять по выражению:

$$U_{ni\text{ост}} = (1 - n_{i*}^2) / (1 - n_{i*}^2 + k_p n_p^2), \quad (22)$$

расчетное значение K_U после установки фильтров:

$$K_{U\text{ост}} = \left(\sum_{n_n}^{n_n} U_{ni\text{ост}}^2 \right)^{1/2}. \quad (23)$$

Установлено, что на промышленных предприятиях наибольшее применение имеют широкополосные фильтры второго порядка и фильтры С типа (рис. 4, б). Мощность конденсаторных батарей этих фильтров определяется по выражению (18), а ток $I_{\Sigma n}$ в выражении (18) определяется по формуле:

$$I_{\Sigma n} = \left(\sum_{n_n}^{n_n} (I_{ni} \sigma_{ni})^2 \right)^{1/2}, \quad (24)$$

где I_{ni} – ток n_i – гармоники протекающий через фильтр n_p -й гармоники; n_n – номер наименьшей гармоники в спектре тока; n_n – номер верхней гармоники учитываемой при расчете фильтра.

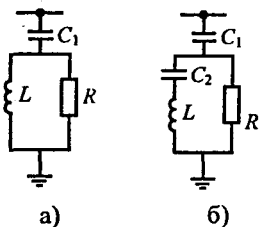


Рисунок 4 –

Широкополосные фильтры компенсации РМ гармоник и мощности второго порядка (а) и фильтр искажения определяется по выражению: С типа (б)

В диссертации приведены формулы для расчета параметров фильтра 2-го порядка и С-типа.

Разработаны критерии расчета и выбора активных фильтров. Мощность активного фильтра только для компенсации РМ искажения определяется по выражению:

$$D = \sqrt{3} U_1 I_{\Sigma n}. \quad (25)$$

Мощность активного фильтра для

искажения определяется по выражению:

$$Q_{\Delta\Phi} = (Q_1^2 + D^2)^{1/2}, \quad (26)$$

где $Q_1 = \sqrt{3} U_1 I_1 \sin \varphi_1$. (27)

Значение $I_{\Sigma n}$ определяется по выражению:

$$I_{\Sigma n} = \left(\sum_{n_n}^{n_n} I_{ni}^2 \right)^{1/2}, \quad (28)$$

В гибридных фильтрах активный фильтр включается последовательно или параллельно пассивному фильтру. Мощность пассивного фильтра выбирается исходя из компенсации реактивной мощности первой гармоники по выражению (27), а мощность активного фильтра выбирается только для компенсации гармонических токов по выражениям (25), (27).

Большое внимание в работе уделено компенсации РМ на промышленных предприятиях с дугowymi печами переменного тока.

Дуговые печи имеют низкий $\cos \varphi$ и оказывают большое влияние на качество электроэнергии.

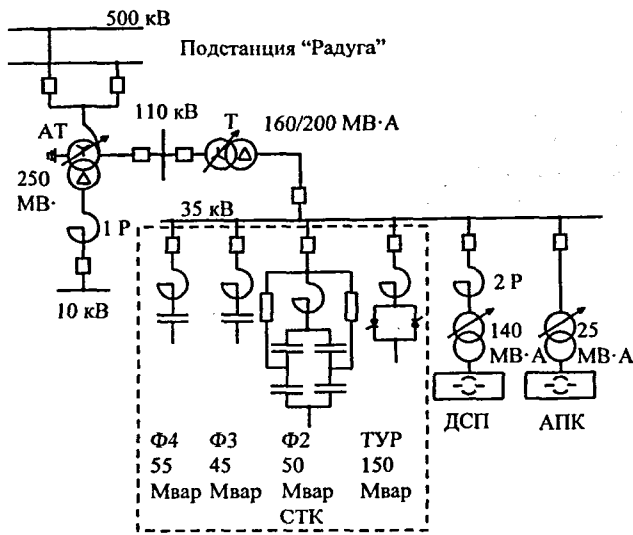


Рисунок 5 – Структурная схема узла нагрузки с дуговой печью ООО “ОМК-Сталь”

Отечественный и зарубежный опыт эксплуатации дуговых печей показал, что наиболее оптимальным способом решения этих проблем является применение статических тиристорных компенсаторов (СТК) прямой или косвенной компенсации. В диссертации приведен порядок расчета основных показателей СТК.

Для автоматизации этих сложных расчетов разработана компьютерная модель узла нагрузки дуговая печь-СТК-питающая энергосистема. Модель разработана для конкретной установки литейно-прокатного комплекса, который будет построен на предприятии ООО “ОМК-Сталь” в г. Выкса. Схема узла нагрузки приведена на рис. 5.

Данная компьютерная модель позволяет определять коэффициенты n -й гармонической составляющей напряжения $K_{U(n)}$, коэффициенты искажения несинусоидальности напряжения K_U , подбирать параметры фильтров и проводить их оптимизацию. Результаты расчета по разработанной модели имеют хорошую сходимость с данными представленными фирмой изготовителем дуговой печи.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

В работе получены и защищаются следующие результаты:

1. Проведенный анализ нормативных документов по компенсации реактивной мощности на промышленных предприятиях, принятых в 80-х годах 20 века, показал, что они устарели и нуждаются в переработке, в связи с изменением цен на оборудование, стоимости потерь электроэнергии, а также появлением новых компенсаторов реактивной мощности.

2. Проведенный анализ и исследование коэффициентов реактивной мощности различных электроприемников показал, что на промышленных предприятиях имеются большие резервы по снижению потерь электроэнергии, за счет компенсации реактивной мощности, и как следствие исключение перетоков реактивной мощности.

3. Установлено, что на промышленных предприятиях со специфическими электроприемниками, применение традиционных средств компенсации РМ (конденсаторных батарей) неэффективно и необходимо применять устройства позволяющие в комплексе решать проблему компенсации РМ и повышения качества электроэнергии (пассивные, активные и гибридные фильтры, статические тиристорные компенсаторы и корректоры коэффициента мощности). Приведены их характеристики и рекомендации по выбору.

4. Разработаны основные положения новой методики выбора средств компенсации РМ на промышленных предприятиях со специфическими электроприемниками, учитывающие как высшие гармоники, так и интергармоники, новые средства компенсации РМ и новые стоимостные показатели на компенсаторы и потери электроэнергии.

5. Проведено исследование интергармоник, с использованием пакета Signal Toolbox, создаваемых дуговыми печами и сварочными машинами, что необходимо для выбора фильтро-компенсирующих устройств.

6. Разработаны компьютерные модели узлов нагрузки с мощными дуговыми печами, позволяющие определять влияние дуговых печей на показатели качества электроэнергии в точках присоединения к электроснабжающим организациям, а также выбирать и оптимизировать параметры фильтро-компенсирующих устройств.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные работы, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Вагин, Г.Я. О необходимости корректировки методики компенсации реактивной мощности в электрических сетях напряжением до 1000 В / Г.Я. Вагин, С.Н. Юртаев // Промышленная энергетика, 2008. № 5. С.31-41.

2. Вагин, Г.Я. К вопросу об экономической целесообразности применения синхронных двигателей для компенсации реактивной мощности на промышленных предприятиях / Г.Я. Вагин, Н.Н. Головкин, С.Н. Юртаев // Промышленная энергетика, 2009. № 6. С.41-47.

3. Вагин, Г.Я. Выбор типа и параметров фильтрокомпенсирующих устройств в электрических сетях с дуговыми печами / Г.Я. Вагин, А.А. Севостьянов, С.Н. Юртаев // Промышленная энергетика, 2009. № 11. С.47-52.

4. Вагин, Г.Я. К вопросу о выборе источников реактивной мощности на промышленных предприятиях / Г.Я. Вагин, А.А. Севостьянов, С.Н. Юртаев // Промышленная энергетика, 2012. № 4. С.35-37.

Научные работы, опубликованные в иностранных научно-технических журналах:

5. Вагин, Г.Я. К вопросу о компенсации реактивной мощности в сетях напряжением до 1000 В / Г.Я. Вагин, Н.Н. Головкин, С.Н. Юртаев // ПРОМЕЛЕКТРО (Украина), 2007. № 6. С.34-42.

Прочие опубликованные научные работы:

6. Вагин, Г.Я. Расчет высших гармоник тока и напряжения в системе электроснабжения с крупной дуговой печью / Г.Я. Вагин, С.Н. Юртаев // Труды

НГТУ “Актуальные проблемы электроэнергетики”. – Н. Новгород, 2009. С. 142-148

7. Вагин, Г.Я. Методы повышения качества электроэнергии и компенсации реактивной мощности на металлургических предприятиях с дугowymi печами / Г.Я. Вагин, А.А. Севостьянов, С.Н. Юртаев // Электрика, 2009. №10. С. 7-11

8. Вагин, Г.Я. Расчет высших гармоник тока и напряжения в системе электроснабжения с крупной дуговой печью / Г.Я. Вагин, А.А. Севостьянов, С.Н. Юртаев // Труды НГТУ “Актуальные проблемы электроэнергетики”. – Н. Новгород, 2010. С. 93-97

9. Вагин, Г.Я. Исследование интергармоник генерируемых специфическими электроприемниками / Г.Я. Вагин, А.А. Севостьянов, С.Н. Юртаев // Труды НГТУ “Актуальные проблемы электроэнергетики”. – Н. Новгород, 2011. С. 78-83

10. Вагин, Г.Я. Электромагнитная совместимость дугowych печей и систем электроснабжения / Г.Я. Вагин, А.А. Севостьянов, С.Н. Юртаев // НТЖ Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2010. №2(81). С. 202-210

11. Вагин, Г.Я. Компенсация реактивной мощности в электрических сетях напряжением 6, 10 кВ / Г.Я. Вагин, Н.Н. Головкин, С.Н. Юртаев // Прогрессивные технологии в технике, экономике, естествознании и образовании: Межвузовский сборник статей. – Арзамас: АПИ, 2008. С. 49-55

12. Вагин, Г.Я. Методы снижения потерь электрической энергии в электрических сетях напряжением до 1000 В / Г.Я. Вагин, С.Н. Юртаев // XIII Нижегородская сессия молодых ученых. Технические науки: Материалы докладов. – Н.Новгород: Изд-во. Гладкова О.В., 2008. С. 128-129

13. Вагин, Г.Я. Повышение качества электроэнергии и компенсация реактивной мощности на металлургических предприятиях с дугowymi печами / Г.Я. Вагин, А.А. Севостьянов, С.Н. Юртаев // Материалы Всероссийской науч.-практ. конф. “Повышение эффективности электрического хозяйства потребителей в условиях ресурсных ограничений”. – М.: МЭИ, 2009 Т. I. С.17-24

14. Вагин, Г.Я. Определение высших гармоник тока и напряжения, генерируемых крупной дуговой печью / Г.Я. Вагин, С.Н. Юртаев // Будущее технической науки: тез.докл. IX Междунар. молодеж. науч.-техн. конф. – Н. Новгород: НГТУ, 2010. С. 74-75.

15. Юртаев, С.Н. Моделирование влияния крупной дуговой печи на несинусоидальность тока и напряжения / С.Н. Юртаев // Будущее технической науки: тез.докл. X Междунар. молодеж. науч.-техн. конф. – Н. Новгород: НГТУ, 2012. С. 81-82.

Личный вклад соискателя. Все основные положения диссертации разработаны лично автором. В работах, написанных в соавторстве, автору принадлежат: [1-5] – постановка задачи, методы расчета, и их анализ; [6-14] – разработка методов анализа и компьютерное моделирование.

10

19

Подписано в печать 20.04.2012. Формат 60x84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 241.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева.
Типография НГТУ. 603950, г. Нижний Новгород, ул. К. Минина, 24.