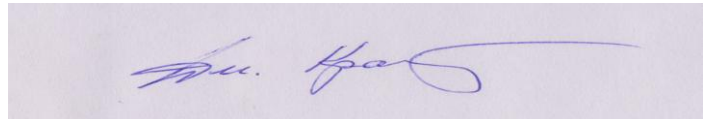


На правах рукописи

Кронгауз Дмитрий Эдуардович



**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ГОРОДСКИХ  
РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ ПОСРЕДСТВОМ УПРАВЛЕНИЯ  
РЕЖИМАМИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции  
и электроэнергетические системы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Красноярск 2011

Работа выполнена в Политехническом институте ФГАОУ ВПО  
«Сибирский федеральный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Пантелеев Василий Иванович**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
**Христинич Роман Мирославович**

кандидат технических наук, доцент  
**Шахматов Сергей Николаевич**

Ведущая организация: ФГАОУ ВПО «Алтайский государственный техни-  
ческий университет им. И.И. Ползунова».

Защита состоится 26 октября 2011 года в 14 часов на заседании диссер-  
тационного совета ДМ 212.099.07 при Сибирском федеральном университете  
по адресу: г. Красноярск, ул. Ленина, 70, ауд. А 204.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Сибирского федераль-  
ного университета по адресу: г. Красноярск, пр. Свободный, 79/10.

Автореферат разослан 19 сентября 2011 года.

Учёный секретарь

диссертационного совета



Т.М. Чупак

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В условиях оптового рынка электроэнергии для повышения конкурентоспособности отечественного производителя на мировом рынке, снижение энергетической составляющей в себестоимости выпускаемой продукции является важнейшей частью технической политики. К субъектам оптового рынка электроэнергии относятся и городские распределительные электрические сети.

Для большинства российских ГРС характерно большое потребление реактивной мощности (РМ), что вызывает увеличение потерь мощности и напряжения, а значит, ухудшает качество электроэнергии (КЭЭ).

Ухудшение КЭЭ, или другими словами, повышение уровня электромагнитных помех (ЭМП) в системах электроснабжения (СЭС), обусловлено технологическим процессом производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии (ЭЭ).

Нерациональное управление потоками РМ, появление новых технических средств, наличие высших гармоник в ГРС приводит к снижению надёжности электрооборудования ГРС, увеличению оплаты за ЭЭ, сокращению срока службы электрооборудования, увеличению затрат на ремонт и обслуживание. Повсеместное внедрение новых технических устройств, часть которых является источниками высших гармоник, заставляет посмотреть на проблему компенсации РМ, как на уменьшение влияния гармоник на устройства компенсации РМ, и на обеспечение бесконфликтной работы оборудования городской распределительной сети (ГРС).

КЭЭ зависит от уровня ЭМП, причиной которых в значительной степени является режим потребления РМ. Всё это обуславливает актуальность проблемы регулирования потоков РМ применяя при этом комплекс потребителей и источников.

Значительный вклад в исследование и разработку способов управления режимами электрических сетей внесли В.А. Веников, Ю.С. Железко, В.И. Идельчик, В.А. Трошин, А.А. Фёдоров и многие другие учёные и инженеры.

Управление потоками РМ следует осуществлять в пространственно-временной области с учётом взаимосвязи всех электроприёмников, входящих в состав ГРС, для обеспечения бесконфликтного регулирования источниками и потребителями РМ и достижения оптимального её уровня. С возросшими возможностями систем учёта, контроля и управления потоками электроэнергии, появлением новых программно-вычислительных комплексов (ПВК) возникла необходимость расширения методологических подходов к реализации мероприятий по снижению уровней затрат на ЭЭ в целом, в частности, на РМ.

**Объект исследований:** городские распределительные электрические сети (на примере муниципального унитарного предприятия «Городские электрические сети» г. Зеленогорск, Красноярский край).

**Предмет исследований:** режимы регулирования потоков реактивной мощности для достижения оптимального её уровня.

**Цель работы** – повышение эффективности и надёжности работы оборудования ГРС посредством рационального использования технических характеристик источников и потребителей реактивной мощности.

**Задачи работы:**

1. Установить причины несоответствия уровней электромагнитных помех, напряжений и частоты в ГРС и определить состав и характеристики потребителей и источников РМ, способных выполнять функции регуляторов потоков РМ в ГРС на заданных интервалах графика нагрузки.

2. Разработать методику использования источников и приёмников РМ для управления потоками РМ независимо от потребления АМ на заданном интервале графика нагрузки, основанную на разделении нагрузки на корректируемую и некорректируемую, участвующую в управлении потоками РМ для поддержания качества ЭЭ и электромагнитной совместимости в соответствии с российскими стандартами.

3. Разработать алгоритм оценки эксплуатационных характеристик потребителей–регуляторов (ПР) РМ, способных изменять потребление (генерацию) РМ для обеспечения экономического значения РМ, и принцип ранжирования ПР РМ согласно требованиям к надёжности их работы и к КЭЭ.

4. Разработать критерии ранжирования и выбора устройств компенсации реактивной мощности ГРС.

5. Разработать имитационную модель регулирования потоков РМ и уровней напряжений в ГРС, с использованием возможностей промышленного программно-вычислительного комплекса (ПВК) АНАРЭС – 2000.

**Методы исследований.** При решении сформулированных выше задач использовались методы теории электрических цепей, теории электромагнитных переходных процессов, техноценологические методы, элементы теории нечётких множеств, имитационного моделирования.

**Научная новизна** результатов исследования заключается в следующем:

1. Обоснована возможность управления потоками РМ независимо от потребления электроустановками АМ на заданном интервале графика нагрузки с комплексным учётом пространственно – временной взаимосвязи потребителей и регуляторов РМ, режимных, технологических и эксплуатационных ограничений.

2. Определены критерии ранжирования электроустановок ГРС в соответствии с их пространственно–временной взаимосвязью для наиболее эффективного регулирования потоков РМ в различные интервалы времени.

3. Обоснована целесообразность применения метода нечётких логических вычислений (фаззи-технологий), который позволяет быстрее, в сравнении с традиционными методами, оценить выбранные критерии и тем самым ускорить процесс ранжирования.

**Основные положения,** выносимые на защиту:

1. Закономерности изменения глубины регулирования РМ независимо от уровня АМ, позволяют прогнозировать значения показателей РМ в ГРС в режиме реального времени.

2. Алгоритм управления потоками РМ на основе многофункционального ранжирования электроприёмников и реализация методов и способов электромагнитной совместимости обеспечивают бесконфликтную совместную работу электроустановок ГРС с учётом их иерархии в экономически эффективных энергосберегающих режимах.

3. Программно – логический алгоритм решения задач управления потоками РМ в ГРС.

**Достоверность результатов**, полученных в диссертации, подтверждается совпадением теоретических и экспериментальных результатов исследований, что говорит об адекватности созданной с применением ПВК АНАРЭС-2000, имитационной модели реального исследуемого объекта и положительными результатами внедрения разработанных методов анализа, расчёта и выбора параметров элементов СЭС, данными по показателям режимов работы муниципального предприятия электрических сетей (МУП ЭС), «ОАО ПО электрохимический завод» г. Зеленогорска Красноярского края при относительной погрешности не более 10%.

**Практическая значимость** состоит в том, что: методы, способы и алгоритмы ранжирования устройств компенсации реактивной мощности (УКРМ), выбора мощности КУ, регулирования потоков РМ независимо от АМ на заданном временном интервале графика нагрузки, регулирования потоков РМ с применением программно – вычислительного комплекса ПВК АНАРЭС – 2000 – могут быть использованы при эксплуатации СЭС в условиях регулирования параметров КЭЭ на шинах потребителя.

Предложенные методы, способы и алгоритмы управления показателями КЭЭ потребителей, повышают оперативность и обоснованность принятия решений, способствуют снижению отказов электрооборудования предприятия, улучшению качества работы электроприёмников.

**Апробация работы.** Основные положения и научные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на всероссийских и межвузовских конференциях: Всероссийская научно – техническая конференция «Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования» (г. Томск, 2008 г.); XXV межвузовская научно-практическая конференция профессорско – преподавательского состава «Проблемы и перспективы совершенствования охраны государственной границы и объектов» (г. Калининград, 2009 г.); X Всероссийская научно-техническая конференция «Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города» (г. Красноярск, 2009 г.); Всероссийская научно – техническая конференция «Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования» (г. Томск, 2010 г.); на научно-технических семинарах кафедры «Электроснабжение и электрический транспорт» Сибирского федерального университета.

**Использование результатов диссертации.** Результаты диссертации использованы в работе муниципального предприятия муниципальных электрических сетей МУП ЭС, города Зеленогорска, Красноярского края.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ, из которых 4 статьи в изданиях по перечню ВАК.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка литературы из 102 наименований и 4 приложений. Общий объём 187 страниц, иллюстрирован 64 рисунками.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** приводится общая характеристика работы, обосновывается её актуальность, даётся краткая характеристика целей работы, полученных результатов, научная и практическая ценность, изложена структура работы.

**В первом разделе** проведён анализ научно-технических проблем качества электроэнергии (КЭЭ), которое определяется уровнем помех в городской распределительной сети при различных режимах работы.

Приводятся основные документы, которые устанавливают основные положения по контролю КЭЭ. Отмечается, что несоответствие качества ЭЭ требованиям стандартов приводит к сокращению выпуска продукции, её браку, повышению удельных расходов ЭЭ.

Отрицательными последствиями, снижения КЭЭ, являются увеличение потерь активной и реактивной мощностей (AM) и (PM); сокращение срока службы электрооборудования; увеличение капитальных вложений в системы электроснабжения (СЭС); нарушение условий нормального функционирования электроприёмников и потребителей в целом; нанесение вреда окружающей среде и здоровью человека.

Для предотвращения таких последствий или их ограничения необходимо управление КЭЭ, которое реализуется в форме методических, организационных и технических мероприятий.

При эксплуатации электрических приборов, аппаратов и электрооборудования, работающих в различных эксплуатационных условиях, окружающая среда и технические средства воздействуют друг на друга агрессивно, либо благоприятно. Если взаимодействие имеет агрессивный характер, то среда и технические средства несовместимы, что приводит к недопустимому нарушению функциональных свойств электрооборудования. Поэтому взаимодействие должно быть сбалансировано до уровня *электромагнитной совместимости* (ЭМС), согласно стандарту ГОСТ Р 50397 – 92.

На уровень ЭМП, а соответственно на потери и качество ЭЭ в электрических сетях, наиболее существенное влияние оказывает режим реактивной мощности.

Управлению режимами PM посвящено множество работ с различными подходами к решению этой проблемы. В настоящей работе на примере городской распределительной сети, представляется системный подход, при котором

предлагается рассматривать промышленные объекты «сверху вниз», как сложные иерархические производственные системы. При этом каждый уровень иерархии характеризуется своими свойствами и закономерностями. Различные предприятия и разные уровни напряжения рассматриваемых систем непосредственно связаны между собой и не предполагают неизменного установившегося режима.

При таком подходе учитываются интересы всех уровней управления при регулировании потоков РМ, приведении к соответствию с российскими стандартами уровней ЭМП, нормировании энергозатрат.

При формировании режима электропотребления предприятия основными факторами, влияющими на его структуру, являются режимные ограничения электропотребления и показатели качества ЭЭ; организационно-производственные ограничения; технологические ограничения; эксплуатационные ограничения.

Режимные ограничения по РМ рассматриваются в двух аспектах: зависимый и независимый.

Зависимый регламентирован руководящими документами и вводится энергоснабжающими организациями в виде усредненного за получасовые (часовые) промежутки времени значения РМ ( $Q_9$ ) на периоды максимальных нагрузок ( $\Delta T_{\max}$ ), минимальных нагрузок ( $\Delta T_{\min}$ ) энергосистемы, на специальные договорные периоды суток ( $\Delta T_{\text{дог}}$ ) и непосредственно влияет на формирование графика нагрузки по РМ предприятия.

Под независимым подразумевается работа электротехнического комплекса, которая влечёт за собой изменение параметров работы электрической сети.

Режимные ограничения следует рассматривать с особой тщательностью.

Организационно-производственные ограничения определяют возможность планировать и осуществлять работу участков (цехов) предприятия в ритме, обеспечивающем выполнение производственной программы с учетом социальных и физиологических требований. Формализовать эти ограничения возможно посредством потребляемой АМ, при этом РМ с этими ограничениями не связана.

Технологические ограничения регламентируют длительность и диапазон увеличения (уменьшения) нагрузки технологических установок, согласно требованиям правил безопасности и эксплуатации. Их предлагается задавать усредненными получасовыми (часовыми) промежутками времени, минимально необходимыми значениями АМ предприятия и соответствующими этим величинам значениями РМ. Вместе с тем, соответствие прогнозного значения РМ плановому значению АМ позволяет ограничиться заданием только АМ.

Эксплуатационные ограничения регламентируют пределы изменения текущих и усредненных за получасовые (часовые) промежутки времени значений АМ и РМ электроустановок и электроприемников в соответствии с требованиями правил безопасности и эксплуатации электроустановок.

Состав приёмников в процессе работы ГРС, с учётом режимных ограничений, на различных временных интервалах, может быть различным. Это следует и из опытных данных, полученных автором при исследовании Муниципального унитарного предприятия «Электрической сети» г. Зеленогорска рисунок 1. Из графиков видно, что практически при одном и том же значении АМ в узле нагрузки, РМ может принимать значения, отличающиеся на 45%, при постоянстве напряжения.

Кривая 1 соответствует нагрузке с малым количеством синхронных и асинхронных двигателей. Кривая 2 соответствует нагрузке, содержащей большее количество двигателей (СД и АД), чем и объясняется различие показанных на графике статических характеристик.

Заданного уровня РМ можно достичь различными способами исходя из сочетания приёмников и источников РМ, находящихся во включенном состоянии в заданный интервал регулирования. При этом необходимо знать возможности диапазона изменения РМ того или иного узла нагрузки.

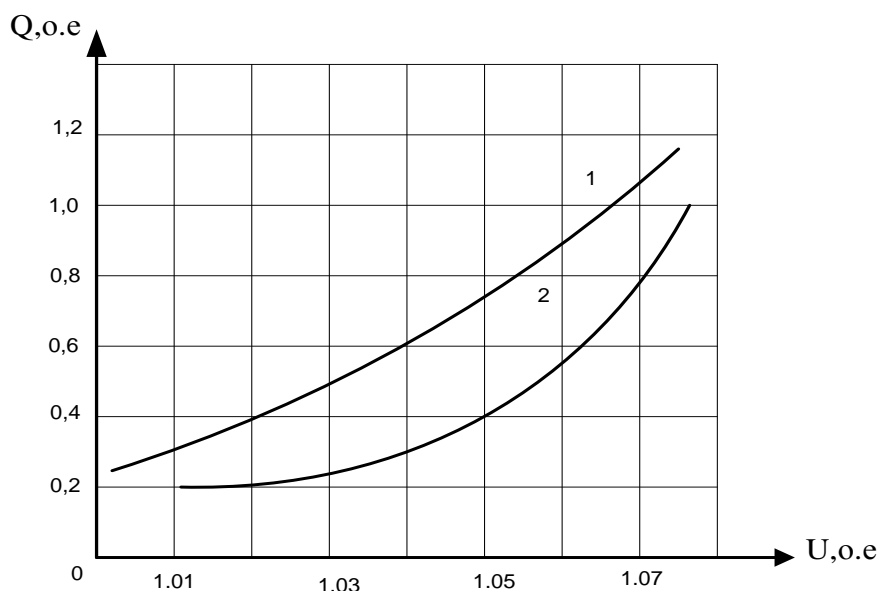


Рисунок 1. Статические характеристики РМ в узле нагрузки

Вывод о независимости регулирования РМ от АМ позволяет сформировать принципы прогнозирования и планирования потребления РМ:

- регулирование РМ непосредственно не связано с выпуском продукции;
- прогнозное значение РМ регуляторов соответствует плановому значению АМ с учетом уровней напряжения и соответствующих токов возбуждения имеющихся СД.

На основании вышеизложенного можно формировать структуру графика РМ таким образом, что при прогнозировании работы предприятий и потребностей жилищно-бытового сектора, питаемых от подстанций ГРС, на всех временных интервалах (часовых или получасовых) задавать прогнозное и плановое значения АМ и соответствующие им плановое и прогнозное значения РМ, со-



ответствующие режимным, технологическим, организационно-производственным, эксплуатационным ограничениям и договорным обязательствам. Кроме того, следует обеспечивать экономические  $Q_э$  (заданные энергосистемой) значения РМ на каждом временном интервале. Это обеспечит более эффективное использование ЭЭ в ГРС, позволит избежать штрафных санкций энергосистемы за нарушение режима потребления РМ. Более того, возможно получить скидки в часы использования максимума экономического значения РМ. Экономического значения РМ можно добиться с помощью комплекса ПР-РМ: секционированных и несекционированных конденсаторных батарей (КБ), фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ), синхронных двигателей (СД), асинхронных двигателей (АД), устройств коррекции тока и напряжения (УКТиН) (активных фильтров).

Для исключения надбавок за использование РМ подключенными источниками РМ,  $Q_{ку}$  должна удовлетворять требованию:

$$Q_{ку} = Q_{ф} - Q_э, \quad (1)$$

где  $Q_{ф}$  – фактическое потребление РМ предприятием в часы максимума энергосистемы,  $Q_э$  – экономическое значение РМ, заданное энергосистемой.

Отсюда следует необходимость разработки алгоритма управления потоками РМ, что позволяет сузить круг регуляторов, которые необходимо классифицировать и ранжировать на основе их классификационных характеристик.

Цель ранжирования потребителей и источников РМ – составление очередности ввода регулятора в действие, обеспечивающей эффективную реализацию решений о регулировании показателей режимов электропотребления предприятия на определенных интервалах времени.

Для решения задачи ранжирования необходимо определить критерии ранжирования; выявить их значимость; вывести алгоритм ранжирования; связать критерии и алгоритм с формированием режимов электропотребления по РМ предприятия.

**В разделе 2** приведена обобщённая схема городской распределительной сети (ГРС). Проведён анализ комплекса потребителей-регуляторов (ПР) РМ. В ГРС могут быть в качестве потребителей и источников РМ конденсаторные батареи (КБ) нерегулируемые и регулируемые; синхронные машины: синхронные двигатели (СД) и синхронные компенсаторы (СК); асинхронные двигатели (АД); фильтрокомпенсирующие устройства (ФКУ); устройства коррекции искажения формы кривой тока и напряжения (УКТиН) (активные фильтры).

Для оценки регулирующих свойств потребителей-регуляторов РМ используется понятие «глубина регулирования» (ГР), которая в общем виде, определяется как отношение разности величины РМ до и после регулирования к номинальной РМ в рассматриваемом узле нагрузки и позволяет определить эффективность работы того или иного регулятора.

$$\Gamma_{i(t)} = \frac{Q_f - Q_j}{Q_n}, \text{ о.е.}, \quad (2)$$

где  $Q_n$ ,  $Q_j$  и  $Q_f$  - РМ соответственно номинальная РМ, РМ до и после включения устройств регулирования.

Установлена глубина регулирования РМ  $i$  - го узла нагрузки, содержащего КБ

$$\Gamma_i = \frac{Q_y}{Q_{уном}} - \frac{0,91Q_{кб}U_y^2}{Q_{кб}U_{ном}}, \text{ о.е.} \quad (3)$$

Во всех случаях (режимов включения–отключения КБ, фиксированных в определённый момент времени величинах активной и реактивной мощности нагрузки  $P_{эн}$  и  $Q_{эн}$ ), прослеживается независимость регулирования мощности КБ от активной мощности. Глубина регулирования с применением КБ зависит от напряжения и РМ генерируемой КБ. Аналогичные выводы справедливы и для ФКУ, как несекционированной КБ.

Для СД

$$\Gamma_{сд} = \left| \frac{Q_{сд} \sqrt{I_{ej}}}{Q_{ном}} - \frac{Q_{сд} \sqrt{I_{ef}}}{Q_{ном}} \right|, \text{ о.е.} \quad (4)$$

где индекс  $j$  соответствует режиму работы СД до регулирования, а индекс  $f$  после регулирования;  $U$  - напряжение,  $I_g$  – ток возбуждения СД.

Глубина регулирования для АД зависит от вида воздействия (отключение-включение нагрузки, регулирование нагрузки, регулирование напряжения), может быть записана в виде, представленном в таблице 1.

Таблица 1

Глубина регулирования АД

Глубина регулирования	Виды регулирования		
	Отключение включение	Регулирование нагрузки	Регулирование напряжения
$\Gamma_P$	$(0 \div 1) P_n$	$(0,25 \div 1) P_n$	0
$\Gamma_Q$	$(0 \div 0,95) Q_n$	0	$(0 \div 0,5) Q_n$

Из таблицы следует, что при условии не отключения АД, регулировать его РМ можно за счёт изменения напряжения, при этом глубина регулирования может достигать 50% от номинальной РМ.

На основании таблицы 1 для АД можно принять, что:

– при изменении коэффициента загрузки АД от 0,35 до 1 при постоянном напряжении на его зажимах (при любой схеме соединения обмоток статора) изменением РМ можно пренебречь;

– при отклонении напряжения в допустимых российскими стандартами пределах изменением активной мощности АД можно пренебречь.

Общая погрешность определения глубины регулирования при этих допущениях не превышает 5%.

Устройства коррекции тока и напряжения (УКТиН) (активные фильтры), предназначены для компенсации высших гармоник в сети, к которой подключены полупроводниковые преобразователи или преемники.

УКТиН эффективно корректируют коэффициент мощности при индуктивных нагрузках и служат также виртуальным сопротивлением для предотвращения возможного резонанса гармоник. В целом, активный фильтр гармоник значительно снижает гармонические искажения кривой напряжения, а также нагрев трансформаторов и кабелей.

Для определения реальной глубины регулирования, как отдельных источников и потребителей РМ, так и узла нагрузки в целом необходимо определить факторы, влияющие на режимы их работы. Это достаточно полно можно проиллюстрировать в виде таблицы 2.

Таблица 2

Факторы, влияющие на работу потребителей и регуляторов

Факторы	Вид потребителей и источников РМ				
	К Б	С Д	А Д	Ф КУ	УК ТиН
Технологический		+	+		
Пространственный	+	+	+	+	+
Режимный: -зависимый -независимый	+	+	+	+	
	+	+	+	+	
	+	+	+	+	+
Временной	+	+	+	+	

После определения факторов, влияющих на режимы работы регуляторов РМ, необходимо определить состав регуляторов РМ для узла нагрузки ГРС, подстанции входящей в состав ГРС или предприятия в целом. При этом необходимо иметь информацию о техническом состоянии регуляторов, возможности управлять ими и о располагаемой резервной мощности.

Для оценки глубины регулирования (ГР) РМ на определенном временном интервале, используется показатель глубины регулирования (ПГР) ( $PX$ )- средневзвешенное во времени значение глубины регулирования, которое может быть представлено следующим выражением:

$$PX = \frac{\sum_{i=1}^n \Gamma_i^{+} \Delta t_{k,i}^{+} + \sum_{i=1}^n \Gamma_i^{-} \Delta t_{k,i}^{-}}{\Delta T^{+} + \Delta T^{-}} \quad (5)$$

где  $\Gamma_i^{+}$  – глубина регулирования при сбросе нагрузки при  $i$  – ом воздействии на  $k$  – й объект за период  $\Delta t_{k,i}^{+}$ ;  $\Gamma_i^{-}$  – тоже при набросе нагрузки;  $I$  – количество воздействий;  $\Delta T^{+}$  и  $\Delta T^{-}$  – общий период регулирования, соответственно при сбросе и набросе нагрузки;

$$\beta_{ki} = \begin{cases} \frac{\Delta t_{ki}}{\Delta T^{(+)(-)}}, & \text{если } \Delta t_{k,i} < \Delta T^{+ -} \\ 1, & \text{если } \Delta t_{k,i} \geq \Delta T^{+ -} \end{cases}.$$

На практике состав нагрузки на каждом интервале регулирования не бывает постоянным, поэтому для эффективного регулирования потоками РМ предлагается ранжировать регуляторы в порядке, который обеспечит их наиболее эффективное использование на заданном интервале времени. Ранг - это многофакторная функция, зависящая от времени и пространства, технических характеристик регуляторов, технологических, организационных и режимных ограничений.

В общем виде функцию ранга можно записать в виде.

$$PA = f(K_i, t_i, Q_{ген}, Q_{э}), \quad (6)$$

где  $K_i$  – критерии ранжирования;  $t_i$  – регламентируемое время;  $Q_{ген}$  – текущее значение РМ, генерируемое источниками РМ;  $Q_{э}$  – экономическое значение РМ.

Кроме того, в критериях ранжирования необходимо учитывать технические характеристики регуляторов, а также их электромагнитную совместимость с электроприёмниками и другими регуляторами РМ, чтобы обеспечить бесконфликтную работу электрооборудования предприятия.

Критерии ранжирования регуляторов РМ можно разделить на три группы по принципу управления: с автоматическим, автоматизированным и ручным управлением. Все типы воздействия на регуляторы РМ предполагают один из этих видов управления.

По длительности формирования управляющих воздействий регуляторы можно разделить на две группы:

– длительность реализации управляющего воздействия на регулятор ( $\Delta t_p$ ) превышает длительность формирования управляющего воздействия ( $\delta T^P$ ) соответствующими техническими средствами при автоматическом (автоматизированном) режиме  $\Delta t_p > \delta T^P$ ;

– длительность реализации управляющего воздействия на регулятор ( $\Delta t_p$ ) не превышает длительность формирования управляющего воздействия ( $\delta T^P$ ) соответствующими техническими средствами в автоматическом режиме и при ручном управлении (например переключение вручную отпайки трансформатора)  $\Delta t_p \leq \delta T^P$ .

Классификация регуляторов по длительности использования регулирующих воздействий подразделяют на три группы:

1. Показатель глубины регулирования РМ регуляторов удовлетворяет условию - длительность реализации регулирующего воздействия на регулятор

( $\Delta t_p$ ) не меньше, чем период контроля показателей режимов электропотребления (РЭП) предприятия  $\Delta T^S$ ;

2. Показатель ГР регуляторов формируется в течение интервала, удовлетворяющего условию:  $\Delta t_p$  не меньше, чем период усреднения показателей РЭП предприятия, но меньше, чем  $\Delta T^S$ ;

3. Показатель ГР удовлетворяет условию:  $\Delta t_p < \Delta T^S$ .

Этот признак позволяет оценить потенциальные возможности регулятора с точки зрения полноты использования ГР.

По значению показателя ГР ( $PX$ ) регуляторы подразделяются на три группы:

1. Регуляторы с показателем ( $PX$ ), который соответствует его минимально возможному значению ( $PX_{\min}$ );

2. Регуляторы с  $PX$ , удовлетворяющие неравенству  $PX_{\min} < PX < PX_{\max}$ ;

3. Регуляторы с  $PX$ , удовлетворяющие равенству  $PX = PX_{\max}$ .

По затратам на регулирование регуляторы РМ подразделяются на три группы:

1. Не требующие дополнительных затрат на принятие решения о регулировании показателей РЭП предприятия, реализацию и оценку управляющих воздействий  $Z_{рег} = 0$ ;

2. Затраты на осуществление и оценку решений о регулировании показателей РЭП, которые имеют место, но не превышают планируемых на предприятии соответствующих эксплуатационных затрат  $0 < Z_{рег} \leq Z_{экс}$ ;

3. Эффективно выполняющие функции регуляторов при условии  $Z_{рег} > Z_{экс}$ .

Учёт перечисленных факторов при ранжировании регуляторов предлагается осуществлять с помощью критериев ранжирования. Для ГРС представляется целесообразным максимально адаптировать уже существующие критерии ранжирования, которые включают в себя пространственную и временную составляющие и учитывают взаимосвязь регуляторов между потребителями активной и реактивной мощности, состояние электроприёмников, обеспечивающих постоянную составляющую генерируемой РМ, отражающую надёжность работы регуляторов и их взаимосвязь с технологическими и организационными процессами предприятий.

Последовательность критериев выстраивается по степени убывания их значимости.

Первый критерий ранжирования – удельный экономический эффект на единицу показателя глубины регулирования  $PX$  на интервале  $\Delta T$ .

$$K_{li} \rightarrow \max; K_{li} = \frac{\sum_{n=1}^N \mathcal{E}_{ni} - \sum_{n=1}^N \mathcal{E}_{ni}^*}{PX^{+(-)}(\Delta T)},$$

$$\text{где } \mathcal{E}_{ni}^* = C_{pi} + C_{zpei} + \sum_{\kappa=1}^{\kappa} \Delta I_{\kappa}^2 R_{\kappa} C_a \Delta T + \frac{\Delta T}{T_{мес}} \mathcal{Z}_{pez} + \Delta I_{np}^2 R_{np} C_a \Delta T + Y_{npi}; \quad (7)$$

$$\mathcal{E}_{ni} = C_{cli} + C_{c2i} + \sum_{\kappa=1}^{\kappa} \Delta I_{\kappa}^2 R_{\kappa} C_a \Delta T + \Delta I_{np}^2 R_{np} C_a \Delta T + \mathcal{E}_{npi},$$

где  $C_{pi}$  – надбавка за потребление РМ и энергии;  $C_{zpei}$  – надбавка за генерацию РМ;  $\Delta I_{\kappa}$  – изменение тока на  $\kappa$ –ом участке;  $\Delta T$  – интервал регулирования;  $T_{мес}$  – количество часов в месяц;  $\mathcal{Z}_{pez}$  – затраты на регулирование;  $\Delta I_{np}$  – изменение тока приёмника;  $R_{np}$  – сопротивление приёмника;  $C_{cli}$  – скидка в часы максимума;  $C_{c2i}$  – скидка в договорные часы;  $C_a$  – стоимость одного кВт ч;  $Y_{npi}$  – ущерб от регулирования относительно остальных приёмников;  $\mathcal{E}_{npi}$  – положительный эффект от регулирования относительно остальных источников.

Этот критерий определяет наиболее экономичное использование потребителя или источника в качестве регулятора. В  $\mathcal{Z}_{pez}$  учитывается пространственный фактор, а в  $Y_{npi}$  и  $\mathcal{E}_{npi}$  взаимосвязь регуляторов. Составляющие  $\sum_{\kappa=1}^{\kappa} \Delta I_{\kappa}^2 R_{\kappa} C_a \Delta T$  и  $\Delta I_{np}^2 R_{np} C_a \Delta T$  – учитываются в  $\mathcal{E}_{ni}^*$  в случае их увеличения в результате регулирования. В случае их уменьшения эти составляющие учитываются только в  $\mathcal{E}_{ni}$ .

Второй по значимости критерий ранжирования – значение показателя глубины регулирования (РХ):

$$K_{2i} \rightarrow \max; K_{2i} = PX_i^{+(-)}(\Delta T), \quad (8)$$

$PX_i^{+(-)}$  означает, что показатель ГР рассчитывается отдельно для наброса и сброса нагрузки. Такое разделение необходимо применять во всех критериях содержащих РХ.

Третий критерий ранжирования – приведённые затраты на регулирование для рассматриваемого показателя РЭП предприятия  $K_3$ ;

$$K_{3i} \rightarrow \min; K_{3i} = \frac{\mathcal{Z}_{pez}}{PX_i^{+(-)}(\Delta T)} \quad (9)$$

Четвёртым критерием ранжирования целесообразно принять удельную длительность реализации регулирующих воздействий на регуляторы РМ;

$$K_{4i} \rightarrow \max; K_{4i} = \sum_{i=1}^i \frac{\Delta t_i}{\Delta T}. \quad (10)$$

Пятый критерий ранжирования – удельная длительность формирования регулирующих воздействий на регуляторы РМ

$$K_{5i} \rightarrow \min; K_{5i} = \sum_{k=1}^k \frac{\Delta t_k}{\Delta T}. \quad (11)$$

Шестой критерий ранжирования – длительность перевода в действующие регуляторы РМ

$$K_{6i} \rightarrow \min; K_{6i} = T_{nep}. \quad (12)$$

Следует отметить, что критерии ранжирования тесно связаны с классификацией регуляторов, приведённой выше.

Таким образом, критерий  $K_1$  определяет вид регулируемых показателей, а также учитывает взаимосвязь регуляторов во времени и пространстве;  $K_2$  и  $K_6$  – эксплуатационно–техническую готовность, критерий  $K_2$  определяет классификацию по значению РХ;  $K_3$  – затраты на регулирование;  $K_4$  и  $K_5$  определяют принципы управления, длительность формирования управляющих воздействий и длительность использования управляющих воздействий.

Определить точные значения приведённых критериев, бывает затруднительно, поэтому целесообразно использовать возможности теории нечётких множеств (ТНМ), что подробно изложено в работе.

Для доведения РМ в ГРС до уровня заданного режимными ограничениями энергосистемы необходимы дополнительные потребители-регуляторы РМ. Эта задача может быть решена с помощью методики выбора дополнительной мощности компенсирующих устройств, основанной на использовании методики ранжирования и экономического значения реактивной мощности, что обеспечивает оптимизацию энергозатрат городской распределительной сети при поддержании качества электроэнергии на уровне требований российских стандартов.

**В разделе 3** выявлены особенности работы городской распределительной сети, приведено описание работы ПВК АНАРЭС-2000 и создана имитационная модель рассматриваемой в работе ГРС.

Эффективное управление любым промышленным объектом возможно только в случае, когда основные закономерности его функционирования представлены в виде математического описания, либо промышленный объект представлен в виде имитационной модели. Такое представление является основой для решения задач по управлению производством, как при краткосрочном, так и при долгосрочном перспективном планировании и нормировании расхода ЭЭ, текущем анализе работы предприятия, для расчетов оптимальных режимов электропотребления и многого другого.

Особенности работы городской распределительной сети не позволяют использовать для накопления данных активный эксперимент, так как в условиях непрерывного производства внесение преднамеренных изменений, выходящих за пределы диапазона рабочих значений, невозможно без нарушения нормального технологического процесса. Однако, в настоящее время, представляется возможным провести пассивный эксперимент, иными словами создать имитационную модель, адекватную реальному рассматриваемому объекту, используя при этом современный промышленный программно-вычислительный комплекс ПВК АНАРЭС – 2000. Проведённые с помощью ПВК АНАРЭС – 2000 расчеты режимов схемы, показанной на рисунке 2, и сравнение их результатов с опытными данными подтвердили адекватность рассчитанных режимов

реальным. В работе исследовался реально существующий участок от Красноярской ГРЭС – 2 до МУП ЭС города Зеленогорска.

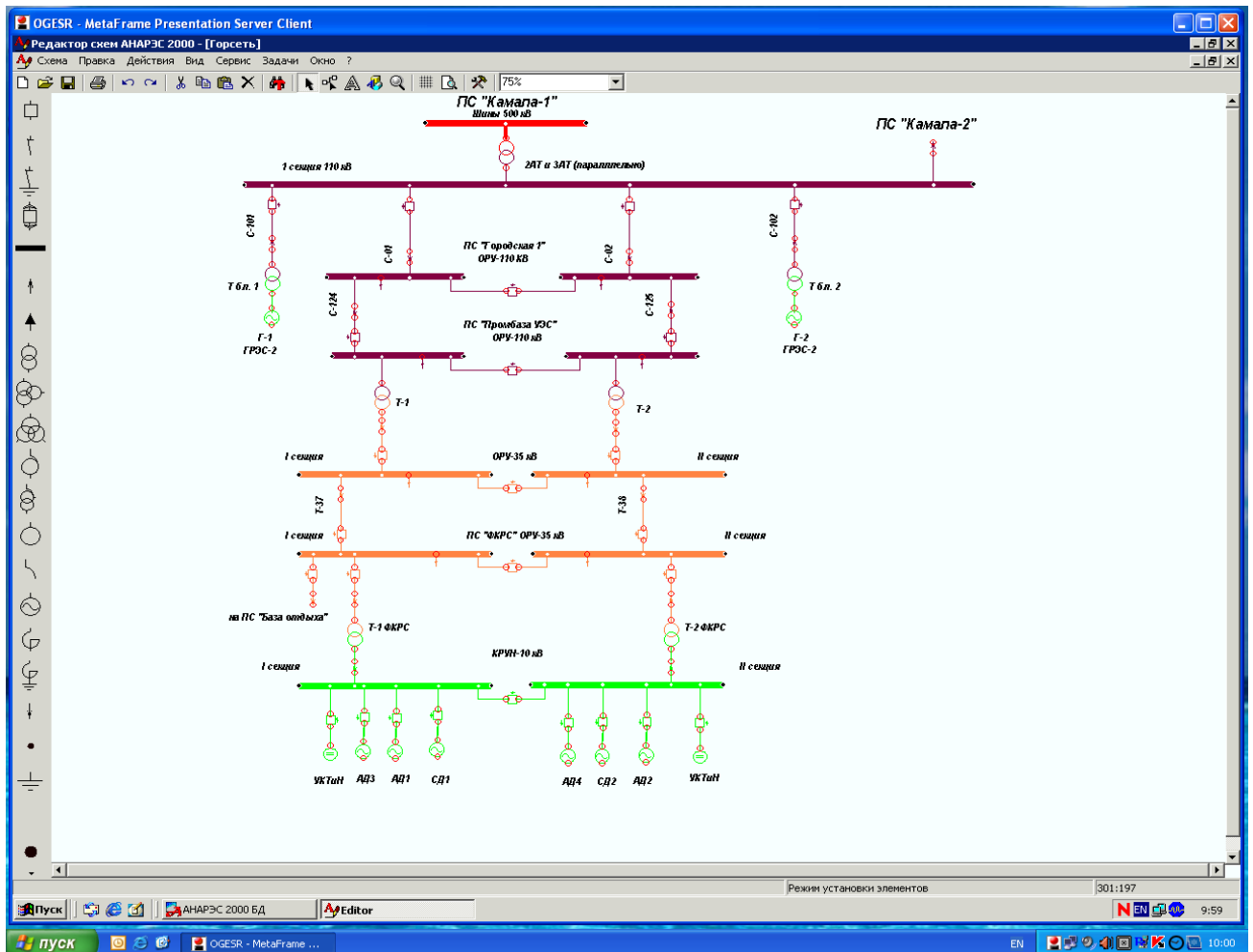


Рисунок 2. Схема (модель) сети электроснабжения

Данная ГРС имеет три подстанции (ПС) (ГПП – 1 (110/10 кВ), ГПП – 2 (110/10 кВ), ФКРС (35/10 кВ)), которые в свою очередь запитаны от ПС разных классов напряжения и питают, как промышленных, так и бытовых потребителей. Графики АМ и РМ получены в результате замеров, проведённых средствами действующей на предприятии АСКУЭ (рисунки 3, 4).

Из анализа потребляемых мощностей в летний и зимний день (неделю) видно, что неблагоприятное соотношение активной и реактивной мощностей (коэффициент мощности  $tg\phi$ ) имеет место в утренние часы летнего и зимнего дня на ПС «Городская – 1», которая питает и промышленных, и бытовых потребителей. На ПС ФКРС, питающей преимущественно промышленные потребители, еще более неблагоприятная ситуация. В летние утренние часы имеет место даже превышение РМ над активной мощностью, а в вечерние часы - приблизительно равные их величины. В зимние утренние часы также не выдерживается  $tg\phi$ , заданный системой (рисунок 4).



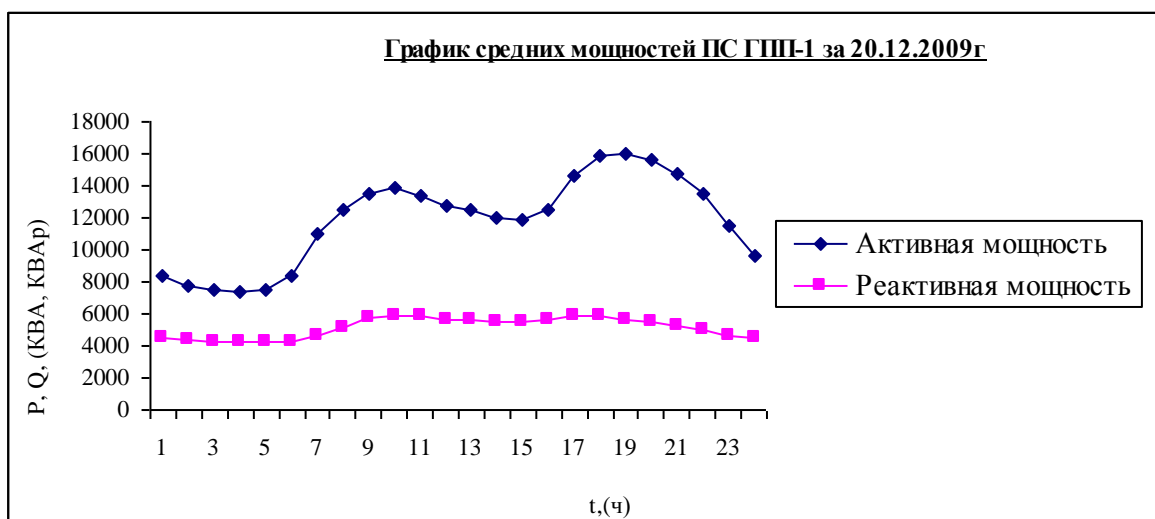
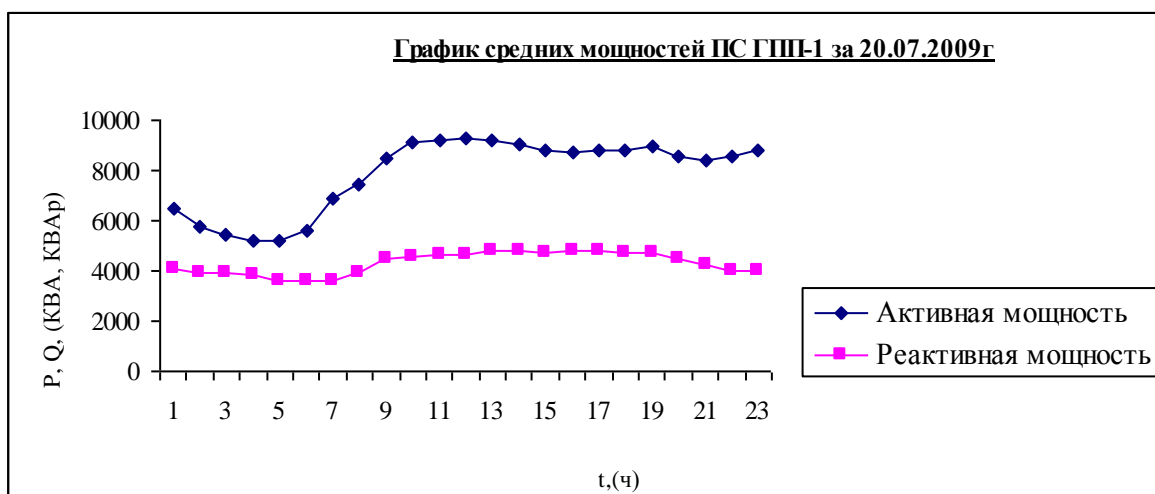


Рисунок 3. Графики активной и реактивной мощностей ПС ГПП-1 в летний и зимний максимумы.

Относительно благоприятное положение наблюдается только на ПС «Городская – 2», от которой запитаны преимущественно бытовые потребители. Компенсирующие устройства на рассматриваемых ПС отсутствуют.

Анализ режимов электропотребления показывает, что все ПС по характеру потребления РМ можно разделить на три категории:

- ПС, по которым абсолютное значение потребляемой РМ остается примерно постоянным в течение суток, а колебания  $tg\phi$  вызваны изменением потребления АМ (ПС «Городская-2»);
- ПС, по которым абсолютное значение потребляемой РМ меняется примерно в одинаковое время суток ПС «Городская – 1»);
- ПС, по которым абсолютное значение потребляемой РМ меняется в течение всего времени и не имеет явно выраженной временной зависимости ПС «ФКРС»).

Можно с уверенностью предположить, что такое деление характерно для ПС всех городских РЭС, так как в любом городе можно выделить ПС, питающие преимущественно бытовых потребителей, смешанных и потребителей преимущественно промышленного типа.

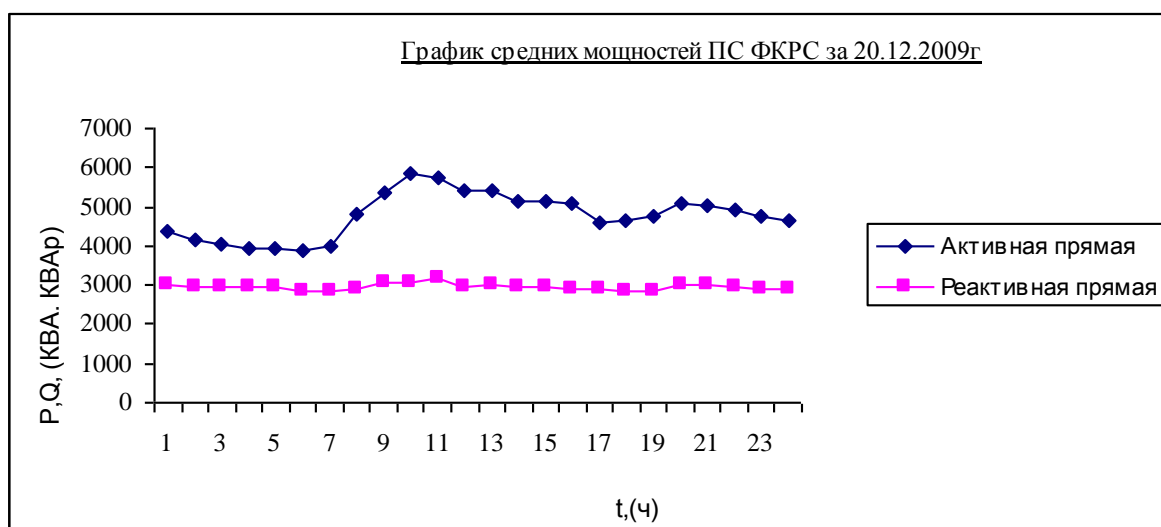
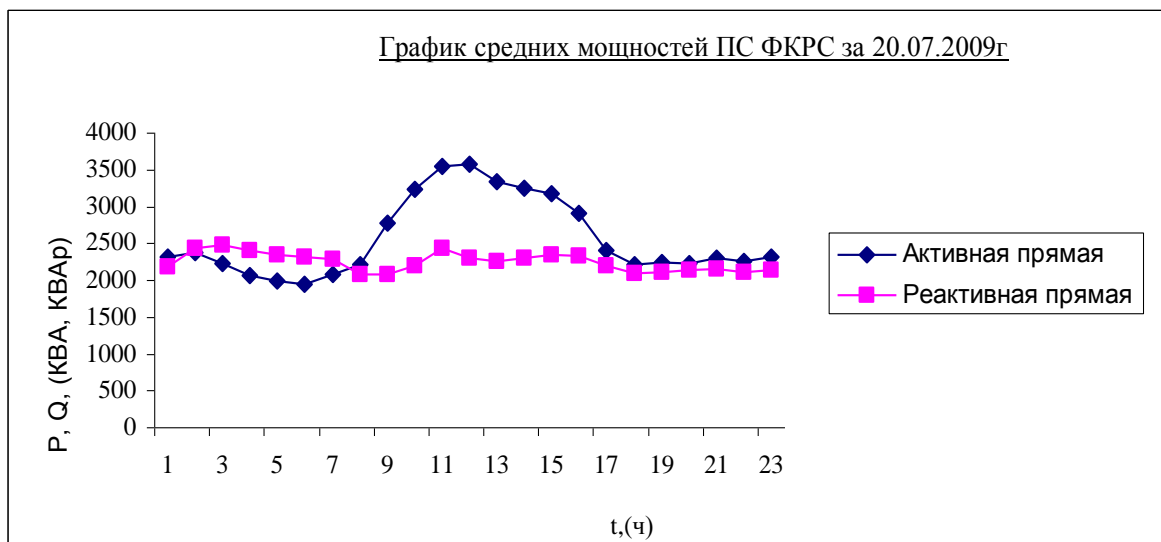


Рисунок 4. Графики активной и реактивной мощностей подстанции ФКРС в летний и зимний максимумы.

Опираясь на разработанную во втором разделе методику ранжирования, можно сделать вывод (причем, в большинстве случаев, достаточно регуляторы сравнить только по первому и второму критериям), что экономически и технически вопрос о компенсации реактивной мощности (КРМ), может быть решен по первой из названных категорий подстанций.. Для них достаточно точно можно рассчитать требуемые мощности и емкости устройств компенсации реактивной мощности (УКРМ).

На ПС второго типа потребления РМ требуются регулируемые УКРМ, однако их регулирование может осуществляться средствами оперативно-диспетчерского управления при наличии систем телеконтроля.

Для ПС третьего типа следует рекомендовать управление в темпе потребления ЭЭ (ситуационное), а в качестве УКРМ – целесообразно применять автоматизируемые статические полупроводниковые устройства компенсации РМ – УКТиН.

Для всех трёх категорий ПС в качестве дополнительных источников компенсации РМ могут использоваться КБ.

**В разделе 4** создана действующая эффективная имитационная модель компенсации РМ на ПС ФКРС с учётом интересов всех уровней СЭС.

Согласно ранжированию КУ на шинах ПС ФКРС целесообразно установить УКТиН, что подтверждается имитационным моделированием, причем рассматривался режим отключения одного из силовых трансформаторов. Очень наглядно это проиллюстрировано графиками на рисунках 5, 6.

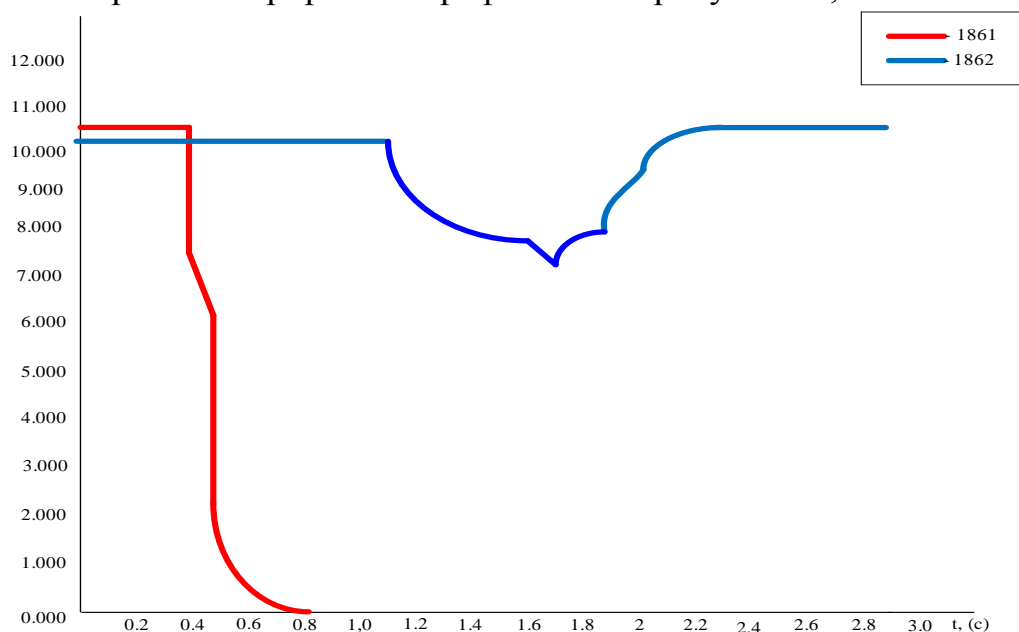


Рисунок 5. График изменения напряжения на секциях 10 кВ ПС ФКРС при отключении трансформатора Т – 1 при КРМ с помощью СК.

Из графиков видно, что при использовании УКТиН, величина напряжения не падает ниже уровня допустимого российскими стандартами, а его регулирование проходит практически безинерционно. При использовании СК, без устройства продольной компенсации (УПК), напряжение на секции шин падает до 6 кВ, что не укладывается в допустимые стандартами пределы, также имеют место качания напряжения в сети, что является причиной электромагнитных помех. Кроме того, помехи могут быть вызваны включением СК. Согласно вышеприведённой методике ранжирования представляется целесообразным использование УКТиН, так как при этом затраты на регулирование значительно меньше, кроме того, при их использовании параметры КЭЭ остаются в преде-

лах допустимых стандартами. Интересно, что для обоих случаев регулирования напряжения включение УКРМ оптимально производить в две ступени, то есть в случае применения СК необходимо автоматическое регулирование.

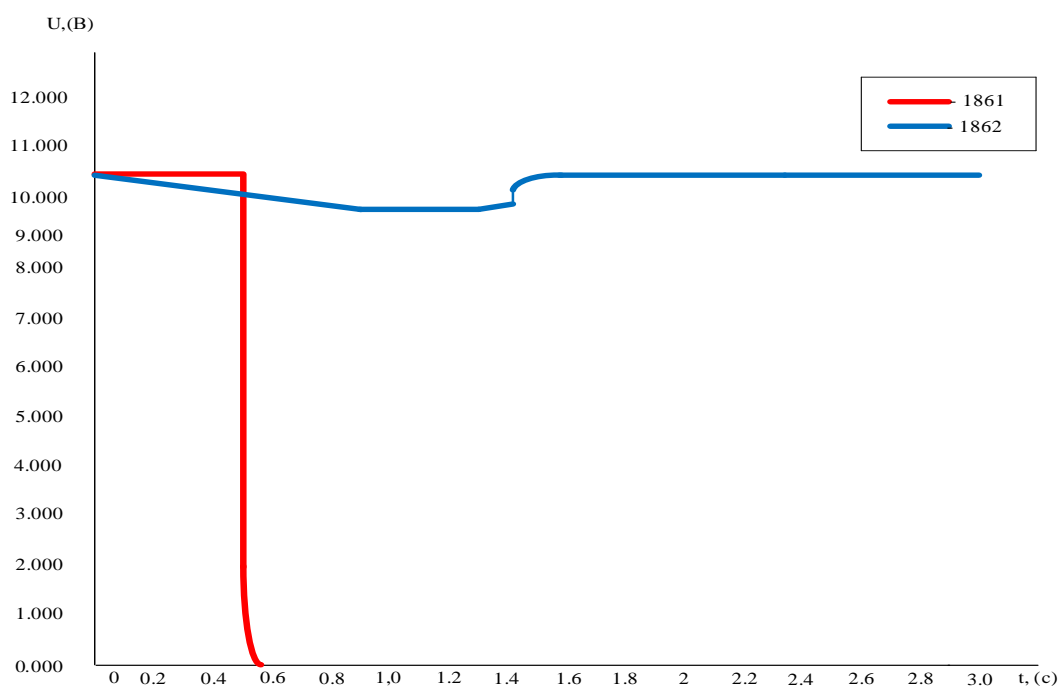


Рисунок 6. График изменения напряжения на секциях 10 кВ ПС ФКРС при отключении трансформатора Т – 1 при КРМ с помощью УКТиН.

Для эффективного управления потоками РМ необходимо создать блок управления, который должен содержать блок ранжирования, блок регулирования и блок формирования управляющих сигналов.

В разделе 1 сформулирован принцип прогнозирования и планирования РМ на основе независимости её регулирования от АМ. Согласно ему регулирование РМ не связано с выпуском продукции, но прогнозное значение РМ регуляторов соответствует плановому значению АМ, которое уже непосредственно связано с технологическими и организационными процессами производства. Так как регулирование АМ не может быть конфликтным, следовательно, регулирование РМ, должно быть бесконфликтным.

В связи с этим одно из основных положений регулирования потоков РМ, заключается в ранжировании регуляторов с целью их наиболее эффективного использования на заданном интервале времени, что обеспечивает бесконфликтность регулирования РМ по признаку территориальной взаимосвязи регуляторов РМ, которая косвенно учитывает их взаимное влияние через уровни напряжения на регуляторах.

В основе временной взаимосвязи лежит принцип баланса мощностей, который обуславливает бесконфликтность управления потоками РМ.

Таким образом, применение предлагаемых методов и средств регулирования потоками РМ обеспечивает бесконфликтное управление таковыми и позволяет

интегрировать ранжированные регуляторы в АСУ СЭС предприятия. Для выполнения поставленной задачи регулирования параметров работы СЭС предприятия может быть применён комплекс, состоящий из измерительной приставки – анализатора - и компьютера с программным обеспечением.

Учитывая вышесказанное, а также принцип баланса мощностей и условия, обеспечивающие электромагнитную совместимость работы электротехнического комплекса предприятия, алгоритм управления потоками РМ может быть представлен в виде, показанном на рисунке 7.

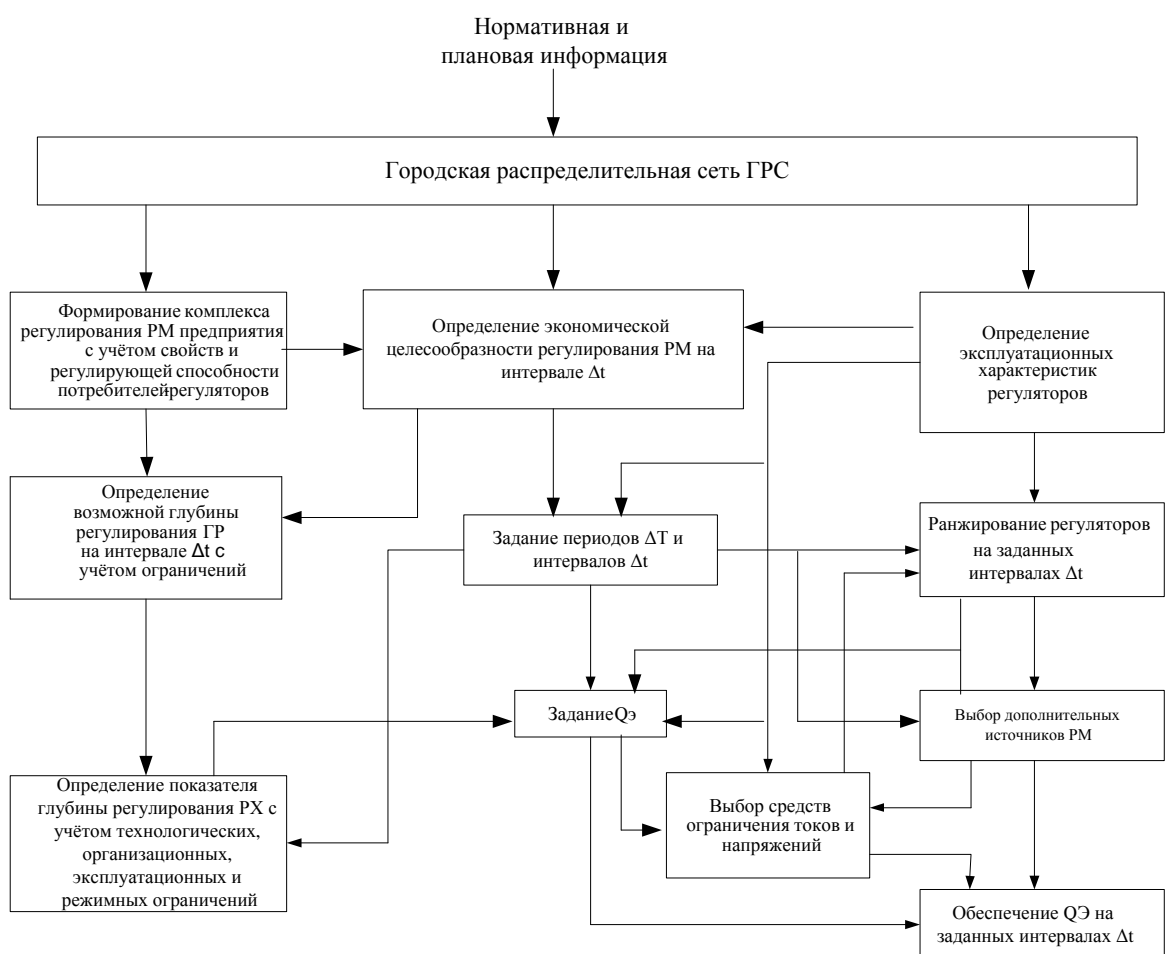


Рисунок 7. Алгоритм управления потоками РМ

На основании анализа работы ГРС в разных режимах, руководствуясь режимными ограничениями, определяется экономическое значение РМ на каждом интервале, которое обеспечивается в дальнейшем с помощью комплекса ПР РМ на каждом интервале времени.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Показано, что одному и тому же значению РМ в сети могут соответствовать различные значения АМ, следовательно, управление потоками РМ, при определённых условиях, может осуществляться независимо от потребления АМ.

2. Установлена совокупность источников и потребителей РМ, способных выполнять функции потребителей–регуляторов в схеме городской распределительной сети в режиме реального времени с учётом ограничений задаваемых энергосистемой, которая включает СК, СД, АД, ФКУ, УПК, УКТиН. Получены возможные диапазоны изменения глубины регулирования (ГР) потребителей–регуляторов РМ в зависимости от технологического, пространственного, режимного и временного факторов.

3. Предложены методы и средства управления потоками РМ в городских распределительных сетях, предусматривающие оценку эксплуатационных характеристик регуляторов для дальнейшего их ранжирования и формирование структуры графиков РМ на основе взаимосвязи в территориальной и информационно–временной областях. Их внедрение позволяет повысить КЭЭ за счёт уменьшения потерь АМ на генерацию и передачу РМ до 20%, а также поддерживать уровни напряжения в сети.

4. Для выбора наиболее эффективных устройств компенсации РМ предложено ранжировать потребители и источники РМ по критериям: удельного экономического эффекта на единицу показателя глубины регулирования; показателя глубины регулирования; удельных приведённых затрат на единицу показателя глубины регулирования; относительной длительности реализации регулирующих воздействий на регуляторы; относительной длительности формирования регулирующих воздействий, длительности перевода регуляторов в действующие.

5. На основании реальных характеристик предприятий, создана имитационная модель, адекватная реальному объекту, выполнен численный (пассивный) эксперимент с применением промышленного ПВК АНАРЭС – 2000, который показал, что при регулировании потоков РМ с применением программной логики, используемой в ПВК АНАРЭС – 2000 эффективность регулирования возрастает на 7–10%.

### **Основные положения диссертации отражены в публикациях: в изданиях по Перечню ВАК**

1. Качинская, Л.М. Применение программно-вычислительного комплекса для расчёта режимов городской электрической распределительной сети / Л.М. Качинская, Д.Э. Кронгауз, В.И. Пантелеев // Промышленная энергетика. – 2010. – № 7 – С. 32 – 35.

2. Кронгауз, Д.Э. Повышение качества электроэнергии в городских распределительных сетях посредством управления режимами реактивной мощности / Д.Э. Кронгауз // Промышленная энергетика. – 2010. – № 10 – С. 39 – 43.

3. Кронгауз, Д.Э. Методы и средства регулирования активной и реактивной мощности в городской электрической сети / Д.Э. Кронгауз // Промышленная энергетика. – 2011. – № 3 – С. 45 – 48.

4. Кронгауз, Д.Э. Ранжирование регуляторов реактивной мощности в городской распределительной сети / Д.Э. Кронгауз // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2011. – № 6 – С. 36 – 45.

#### **В других изданиях и материалах конференций и семинаров**

5. Кронгауз, Д.Э. Анализ электропотребления городской распределительной электрической сети / Д.Э. Кронгауз, В.И. Пантелеев // Материалы Всероссийской научно-технической конференции «Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования». Томск: ТПУ. – 2008. – С. 58 – 59.

6. Кронгауз, Д.Э. Сравнительный анализ точности учёта электропотребления городской распределительной сети в условиях оптового рынка / Д.Э. Кронгауз, В.И. Гнатюк, Л.В. Фельк // Материалы XXV межвузовской научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава «Проблемы и перспективы совершенствования охраны государственной границы и объектов». – Научно – практический сборник №25. Часть 1. Калининград: ФСБ КПИ. – 2009. – С. 116 – 120.

7. Луценко, Д.В. Параметрический синтез / Д.В. Луценко, А.М. Дубовик, Д.Э. Кронгауз, А.А. Заименко // Материалы XXV межвузовской научно-практической конференции профессорско – преподавательского состава «Проблемы и перспективы совершенствования охраны государственной границы и объектов». – Научно – практический сборник №25. Часть 3. Калининград: ФСБ КПИ. – 2009. – С. 13 – 19.

8. Кронгауз, Д.Э. Некоторые критерии выбора устройств компенсации реактивной мощности в городских распределительных электрических сетях / Д.Э. Кронгауз, В.И. Пантелеев // Материалы X Всероссийской научно-технической конференции «Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города». Красноярск: МВДЦ «Сибирь». – 2009. – С. 252 – 259.

9. Кронгауз, Д.Э., Пантелеев В.И. Обеспечение электромагнитной совместимости работы электротехнического комплекса предприятия / Д.Э. Кронгауз, В.И. Пантелеев // Материалы Всероссийской научно – технической конференции «Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования». Томск: ТПУ. – 2010. – С. 140 – 142.

10. Кронгауз, Д.Э. Анализ режимов работы асинхронного двигателя, как регулятора реактивной мощности / Д.Э. Кронгауз, В.И. Пантелеев // «Вести в электроэнергетике» – 2011. – № 4 – С. 54 – 56.