

**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«ГОМЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ П.О. СУХОГО»**

---

*УДК 621.311.1*

**Сычев Александр Васильевич**

**ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ  
ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ И ИСТОЧНИКОВ  
РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ  
ЗАТРАТ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ НА  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ**

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Автореферат диссертации на соискание  
ученой степени кандидата технических наук

Гомель 2003

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации.** Вопросы рационального и экономного использования всех видов энергоресурсов, в том числе и электроэнергии, входят в ряд наиболее приоритетных задач, решаемых на промышленных предприятиях. Актуальность энергосбережения обусловлена, прежде всего, высокой долей импорта энергетических ресурсов в топливном балансе Республики Беларусь и высокой долей энергетической составляющей в себестоимости продукции предприятий, которая достигает 30 %.

Резервы снижения затрат промышленных предприятий на электроэнергию при сохранении объемов производства имеются в повышении уровня режимного взаимодействия потребителей с энергосистемой в едином процессе производства и потребления электроэнергии путем управления работой электрооборудования агрегатов и линий непрерывного производства (далее электрооборудования) и источников реактивной мощности. Управляя работой электрооборудования, предприятия могут формировать оптимальные режимы работы энергосистемы, что способствует снижению издержек на производство электроэнергии и ее стоимости для потребителей. Экономическим рычагом, побуждающим потребителей к регулированию режимов работы, является дифференцирование стоимости электроэнергии по зонам суток. Но глубина регулирования, его характер и экономический интерес потребителей во многом зависят от параметров дифференцирования: характера изменения стоимости электроэнергии внутри тарифных зон, их количества и продолжительности.

Другим аспектом режимного взаимодействия потребителей и энергосистем является компенсация реактивной мощности нагрузки потребителей, являющейся одним из наиболее эффективных средств повышения технико-экономических показателей электрических систем и сетей. При этом величина экономического эффекта зависит от качества управления источниками реактивной мощности, которое обусловлено законами регулирования и техническими средствами их реализации.

Установка в отдельных узлах системы электроснабжения предприятий компенсирующих устройств (КУ), оснащенных автоматическими регуляторами, поддерживающими заданный коэффициент мощности ( $\cos\varphi$ ), частично решает проблему управления реактивной нагрузкой, но недостаточно оптимально для потребителей, так как в течение суток стоимость электроэнергии и величина электрических нагрузок изменяются, что существенно влияет на параметры оптимального режима работы системы электроснабжения. Кроме того, для промышленных предприятий важно минимизировать затраты на установленную мощность КУ, стоимость которых существенно зависит от способов управления их работой.

Таким образом, разработка способов оптимизации режимов работы электрооборудования и источников реактивной мощности на промышлен-

ных предприятиях по критерию минимума затрат на электроэнергию в условиях действия новых тарифных систем, широкого внедрения средств автоматизации контроля электропотребления и управления электрооборудованием, позволяющих качественно повысить уровень режимного обоюдывыгодного взаимодействия промышленных потребителей и энергосистем, является актуальной научно-прикладной задачей.

**Связь работы с крупными научными программами, темами.** Работа выполнялась в соответствии с координационным планом Межвузовской научно-технической программы «Приоритет», 1997-2000 гг. (раздел 6.01 «Разработка методов и средств управления электропотреблением и режимами работы помехочувствительного электрооборудования промышленных предприятий с непрерывным технологическим процессом» № ГР19974884), а также в рамках планов научно-исследовательских работ Гомельского государственного технического университета имени П.О. Сухого (1990-2003 гг.).

**Цель и задачи исследований.** Целью диссертационной работы является разработка новых и совершенствование известных способов оптимизации режимов работы электрооборудования и источников реактивной мощности в системах электроснабжения промышленных предприятий, обеспечивающих снижение затрат на электроэнергию.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

- разработать способ определения тарифных зон суток для дифференцированного тарифа на электроэнергию, максимально стимулирующих потребителя-регулятора к смещению производственных циклов в направлении снижения максимума совмещенной нагрузки энергосистемы;
- разработать математическую модель динамики затрат предприятия на электроэнергию при смещении производственных циклов в условиях дифференцированной стоимости электроэнергии и способ определения оптимальных смещений во времени производственных циклов по критерию минимума затрат на электроэнергию с учетом ограничений, обусловленных технологическими взаимосвязями;
- создать программное обеспечение автоматизированной системы контроля электропотребления для информационного обеспечения задачи оптимизации режимов работы электрооборудования и источников реактивной мощности промышленных предприятий;
- уточнить известные способы оптимального управления источниками реактивной мощности в системах электроснабжения предприятий по критерию минимума затрат на электроэнергию;
- исследовать математические модели параметров потребления реактивной мощности в узле нагрузки при установке КУ с различными способами управления и разработать способ оптимизации установленной мощности этих устройств.

*Объект и предмет исследований.* Объектом исследования являются электрическое хозяйство, режимы работы электрооборудования и источников реактивной мощности в системах электроснабжения промышленных предприятий.

Предмет исследования – способы и средства управления работой электрооборудования и источников реактивной мощности в системах электроснабжения промышленных предприятий, их связь с затратами на электроэнергию.

*Гипотеза.* В качестве гипотезы выдвинуто предположение о том, что снижение затрат промышленного предприятия на электроэнергию возможно за счет смещения во времени производственных циклов электрооборудования в условиях дифференцированной стоимости электроэнергии и оперативного управления источниками реактивной мощности с учетом тарифов на активную и реактивную составляющие электроэнергии, схемы системы электроснабжения и реактивных нагрузок в узлах сети, а также оптимизации установленной мощности КУ. В результате проведенных исследований данное предположение подтвердилось.

*Методология и методы проведенного исследования.* Для решения поставленных в работе задач использовались основные законы теоретических основ электротехники, теории вероятностей и математической статистики, экспериментальные исследования в системах электроснабжения промышленных предприятий.

#### **Научная новизна и значимость полученных результатов:**

- предложен способ определения тарифных зон суток для дифференцированного тарифа на электроэнергию, стимулирующих потребителя к смещению производственного цикла в направлении снижения максимума нагрузки энергосистемы;

- разработана математическая модель динамики затрат на электроэнергию при смещении производственного цикла промышленного предприятия;

- разработан способ определения оптимальных смещений во времени производственных циклов технологических объектов промышленного предприятия по критерию минимума затрат на электроэнергию с учетом ограничений, обусловленных технологическими взаимосвязями;

- создана математическая модель параметров реактивной мощности в узле нагрузки при установке КУ с различными способами управления и регулирования;

- усовершенствованы известные алгоритмы управления источниками реактивной мощности как в отдельных узлах сети, так и в многоуровневой системе электроснабжения предприятия в целом, направленные на снижение стоимости потребляемой электроэнергии.

Полученные результаты способствуют снижению затрат промышленного предприятия на электроэнергию при сохранении объемов произ-

водства, повышению эффективности работы систем электроснабжения предприятий благодаря оптимизации смещений во времени производственных циклов электрооборудования и усовершенствованным алгоритмам работы источников реактивной мощности.

#### **Практическая и экономическая значимость полученных результатов.**

**Практическая значимость** заключается в том, что предложены новые способы оптимизации режимов работы электрооборудования и источников реактивной мощности на промышленных предприятиях. Критерием оптимизации выбраны затраты на электроэнергию при постоянстве других технико-экономических показателей предприятия. Разработан способ определения смещений производственных циклов технологических объектов предприятий во времени с учетом ограничений, обусловленных технологическими взаимосвязями, позволяющий снизить стоимость потребляемой электроэнергии при сохранении объемов производства. Способ опробован и используется на Новобелицком комбинате хлебопродуктов (НКХП, г. Гомель).

Усовершенствованные алгоритмы управления реактивной мощностью синхронных двигателей (СД) позволяют более глубоко снизить затраты на электроэнергию и использованы при разработке программного обеспечения автоматизированной системы управления возбуждением СД на базе микропроцессорного контроллера, два опытных образца которой (техническое задание Главтранснефти МНП СССР № 39-09-50-89) были испытаны на насосной станции «Новозыбков» Гомельского управления нефтепровода «Дружба» и на насосной станции «Лисичанск» Приднепровского управления магистральных нефтепроводов.

Способ определения установленной мощности батарей статических конденсаторов (БСК), управляемых автоматическим регулятором (поддерживающим заданный  $\cos\varphi$  в узле нагрузки) и управляемых программно в суточном цикле, позволяет минимизировать затраты промышленных предприятий на установленную мощность КУ и использован в ПО «Беларуснефть» и на НКХП.

**Экономическая значимость** заключается в оптимизации режимов работы электрооборудования и источников реактивной мощности по критерию минимума затрат на электроэнергию с учетом ограничений, обусловленных технологическими взаимосвязями, что позволяет снизить электроемкость выпускаемой продукции. Так оптимизация смещений во времени технологических циклов НКХП позволила снизить стоимость потребляемой электроэнергии на 15 %, что эквивалентно годовой экономии электроэнергии в количестве 640 тыс. кВт·ч. Применение индивидуальной компенсации реактивной мощности в распределительной сети НГДУ «Речицанефть» позволило уменьшить потери в сети 6 кВ и снизить расход электроэнергии на механизированную добычу нефти на 2,4-2,8 %, что составляет 1,08-1,26 млн кВт·ч в год. Оптимизация режимов работы источни-

ков реактивной мощности на РУП «Белорусский металлургический завод» позволяет сэкономить 49 млн руб. в месяц.

#### **Основные положения диссертации, выносимые на защиту:**

1. Экономико-математическая модель динамики затрат на электроэнергию при смещении во времени производственных циклов технологических объектов промышленного предприятия и способ определения таких смещений по критерию минимума затрат при ограничениях, обусловленных технологическими взаимосвязями, и сохранении других технико-экономических показателей производства неизменными.

2. Способ определения тарифных зон, позволяющий максимально стимулировать потребителя к смещению производственных циклов в направлении снижения максимума совмещенной нагрузки энергосистемы.

3. Экономико-математическая модель, алгоритм и программная реализация оперативного управления источниками реактивной мощности, позволяющие оптимизировать потоки реактивной мощности как в отдельном узле нагрузки, так и в многоуровневой системе электроснабжения промышленных предприятий в реальном времени по критерию минимума затрат.

4. Экономико-математическая модель параметров реактивной мощности в узле нагрузки и способ определения установленной мощности компенсирующих устройств с автоматическим регулятором по  $\cos\phi$  и управляемых программно в суточном цикле по критерию минимума затрат.

**Личный вклад соискателя.** Научные и практические результаты диссертации, положения, выносимые на защиту, разработаны и получены лично соискателем или при его непосредственном участии.

**Апробация результатов работы.** Основные результаты исследований, содержащихся в диссертации, докладывались, обсуждались и получили одобрение на:

– XII сессии Всесоюзного научного семинара «Кибернетика электрических систем» (г. Гомель, 1991);

– 52-й международной научно-технической конференции профессоров, преподавателей, научных работников, аспирантов и студентов Белорусской государственной политехнической академии (г. Минск, 1997);

– международной научно-технической конференции «Современные проблемы машиноведения» (г. Гомель, 1998, 2001);

– международной научно-технической конференции «Энергосбережение. Электроснабжение. Автоматизация» (г. Гомель, 2001);

– научно-технической конференции «Электроснабжение, электрооборудование, энергосбережение» в Российском химико-технологическом университете им. Д.И. Менделеева (г. Новомосковск, 2002).

**Опубликованность результатов.** Результаты диссертации опубликованы в 5 статьях в научных журналах, из них в 1 статье в журнале «Энергетика. Известия ВУЗов и энергетических объединений СНГ», в 2 статьях в журнале «Электрика» (Россия), в 1 статье в журнале «Энергоэффектив-

ность» и в 1 статье в журнале «Вестник ГГТУ», в 1 статье в сборнике научных трудов, в 6 статьях в сборниках материалов международных и республиканских конференций и семинаров, в 4 тезисах докладов. Часть материалов диссертации вошла в монографию Прокопчика В.В. «Повышение качества электроснабжения и эффективности работы электрооборудования предприятий с непрерывным технологическим процессом» (параграфы 6.1 и 6.2). Общее количество опубликованных материалов составляет 82 страницы.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Полный объем диссертации составляет 171 страницу текста, из которых 38 страниц заняты 20 таблицами и 40 рисунками, 8 страниц – списком использованных источников (123 наименования) и 19 страниц – приложениями.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** дана общая оценка влияния управления режимами работы электрооборудования и источников реактивной мощности на промышленных предприятиях с позиций согласованного режимного взаимодействия потребителей и энергосистемы в процессе производства и потребления электроэнергии на эффективность работы обеих сторон. Указано на необходимость разработки новых методов и средств управления электрооборудованием в условиях дифференцированной по зонам суток стоимости электроэнергии. Определен круг проблем, нуждающихся в изучении, и обосновано направление исследования.

**В общей характеристике** работы обоснована актуальность темы, ее связь с научно-исследовательскими работами Республики Беларусь, сформулированы цель и задачи исследования, представлены научная новизна, практическая и экономическая значимость полученных результатов, перечислены основные положения диссертации, выносимые на защиту.

**В первой главе** определяются цели исследования, дается анализ методов и средств управления работой электрооборудования и источников реактивной мощности на промышленных предприятиях. Анализируются существующие способы управления графиком электрической нагрузки потребителей (ГН) в стране и за рубежом, определены основные принципы управления и трудности их реализации. Проанализированы недостатки традиционных способов решения задач управления графиком нагрузки электрооборудования, основанных на директивном ограничении электропотребления со стороны энергосистемы. Показано, что более перспективным способом разрешения режимного противоречия между потребителями и энергосистемой, стремящихся работать с различными по равномерности графикам электрических нагрузок, является дифференцирование стоимости электроэнергии по зонам суток и применение дифференцированного

тарифа. При этом потребитель, сдвигая производственный цикл во времени в пределах  $\pm 2$  часа, без существенных затрат и при сохранении объемов производства может снизить стоимость потребляемой электроэнергии до 10 %. Однако ожидаемого снижения максимума совмещенной нагрузки энергосистемы не происходит, так как смещение производственных циклов отдельных потребителей в направлении роста экономического эффекта приводит к росту данного параметра.

На основании анализа влияния действующих параметров дифференцированного тарифа на экономически выгодные направления смещения производственных циклов ряда предприятий и показатели равномерности совмещенного графика нагрузки сделан вывод о том, что применение унифицированных параметров дифференцированного тарифа к потребителям, имеющим различные по форме графики нагрузки, в принципе, не позволяет согласовать интересы энергосистемы и всех промышленных предприятий, участвующих в регулировании. Для разрешения данного противоречия предлагается для части потребителей устанавливать индивидуальные интервалы тарифных зон, стимулирующие их к смещению производственных циклов во времени в направлении снижения максимума нагрузки энергосистемы.

Рассмотрены существующие методы управления режимами реактивной мощности синхронных двигателей в узлах электрической нагрузки по критерию минимума потерь и решение задачи компенсации реактивной мощности (КРМ) по критерию минимума затрат на установку и последующую эксплуатацию КУ. Показано, что эти методы не учитывают стоимостных показателей режима электропотребления и их изменений в течение суток. Сделан вывод о том, что более глубоко оптимизировать режимы работы источников реактивной мощности можно только при использовании автоматизированной системы на базе микропроцессорного контроллера. Сформулированы основные требования к такой системе.

**Во второй главе** рассматриваются математические модели показателей электропотребления активной и реактивной мощности электрооборудования, позволяющие оптимизировать режимы электропотребления.

Рассмотрены детерминированные и вероятностные способы моделирования электрических нагрузок и предложена стохастическая модель реактивной нагрузки в отдельном узле электрической сети. Модель отражает влияние установленной мощности КУ на параметры реактивной мощности как случайной величины  $Q$  с плотностью вероятности  $f(Q)$  в зависимости от наличия или отсутствия автоматического регулятора, поддерживающего заданный cos $\phi$  в узле нагрузки.

Распределение  $f(Q)$  может быть симметричным, несимметричным и, кроме того, обладать свойством мультимодальности. В работе рассматриваются модели параметров реактивной мощности на основе нормального закона распределения (симметричное распределение) и гамма распределе-



ния (несимметричное распределение). Для случая мультимодального распределения характеристики случайной величины определяются непосредственно из вариационного ряда для выборки.

Из закона распределения реактивных нагрузок можно определить следующие параметры реактивной мощности как случайной величины: среднюю реактивную мощность, дисперсию и стандартное отклонение, среднеквадратичную мощность.

Из анализа влияния мощности КУ на параметры реактивной нагрузки в узле сети как случайной величины для нормального закона распределения получены следующие выражения для средних значений мощности при потреблении  $\bar{Q}_n$  и генерации  $\bar{Q}_g$  реактивной энергии как функций мощности КУ  $Q_{ку}$ :

$$\bar{Q}_n(Q_{ку}) = (\bar{Q}_n - Q_{ку}) \cdot (1 - F_{0,0,7}(\Delta Q)) + \sigma^2 \cdot f_{\bar{Q}_n, \sigma}(Q_{ку}); \quad (1)$$

$$\bar{Q}_g(Q_{ку}) = (\bar{Q}_n - Q_{ку}) \cdot F_{0,0,7}(\Delta Q) - \sigma^2 \cdot f_{\bar{Q}_n, \sigma}(Q_{ку}) \quad (2)$$

при

$$\Delta Q = \frac{Q_{ку} - \bar{Q}_n}{\sqrt{2} \cdot \sigma}; \quad (3)$$

$$Q_{ку} = Q_{ку}^a + Q_{ку}^b, \quad (4)$$

где  $f_{\bar{Q}_n, \sigma}(Q_{ку})$  – функция плотности нормального распределения реактивной нагрузки со средним значением  $\bar{Q}_n$  и стандартным отклонением  $\sigma$ ;  $F_{0,0,7}(\Delta Q)$  – функция распределения случайной величины  $\Delta Q$  с нулевым средним значением и стандартным отклонением, равным 0,7;  $Q_{ку}^a$ ,  $Q_{ку}^b$  – реактивная мощность компенсирующих устройств, управляемых соответственно автоматически и по программно в суточном цикле.

Стандартное отклонение реактивной нагрузки  $\sigma$  как функцию  $Q_{ку}$  можно определить из его связи с размахом случайной величины:

$$\sigma(Q_{ку}) = \frac{Q_{max}(Q_{ку}) - Q_{min}(Q_{ку})}{Q_{max}(0) - Q_{min}(0)} \cdot \sigma(0), \quad (5)$$

где  $Q_{min}(0)$ ,  $Q_{max}(0)$  – границы размаха вариации реактивной нагрузки при отсутствии компенсирующих устройств;  $Q_{min}(Q_{ку})$ ,  $Q_{max}(Q_{ку})$  – границы размаха вариации реактивной нагрузки при подключении компенсирующих устройств мощностью  $Q_{ку}$ ;  $\sigma(Q_{ку})$ ,  $\sigma(0)$  – стандартное отклонение реактивной нагрузки при подключении КУ мощностью  $Q_{ку}$  и при отсутствии компенсации, соответственно.

Среднеквадратичная реактивная мощность  $Q_{ск}$  определяется как:

$$Q_{ск}(Q_{кУ}) = \sqrt{\bar{Q}_n(Q_{кУ})^2 + \bar{Q}_c(Q_{кУ})^2 + \sigma(Q_{кУ})^2}. \quad (6)$$

Для случая гамма-распределения с параметрами «формы»  $a$  и масштаба  $b$  среднее значение потребляемой и генерируемой реактивной мощности при включении компенсирующего устройства мощностью  $Q_{кУ}$ :

$$\bar{Q}_n(Q_{кУ}) = \frac{b^a}{\Gamma(a)} \cdot \int_{Q_{кУ}}^{Q_{max}} (Q - Q_{кУ}) \cdot Q^{a-1} \cdot e^{-bQ} dQ; \quad (7)$$

$$\bar{Q}_c(Q_{кУ}) = \frac{b^a}{\Gamma(a)} \cdot \int_0^{Q_{кУ}} (Q - Q_{кУ}) \cdot Q^{a-1} \cdot e^{-bQ} dQ, \quad (8)$$

где  $Q_{max}$  – максимальное значение реактивной мощности, квар;

$\Gamma$  – гамма-функция Эйлера.

Дисперсия реактивной нагрузки  $D$  зависит только от величины мощности КУ с автоматическим регулированием  $Q_{кУ}^a$ :

$$D(Q_{кУ}^a) = \frac{b^a}{\Gamma(a)} \cdot \int_{Q_{кУ}^a}^{Q_{max}} (Q - Q_{кУ}^a - \bar{Q}_n(Q_{кУ}^a))^2 \cdot Q^{a-1} \cdot e^{-bQ} dQ. \quad (9)$$

Среднеквадратичная реактивная мощность  $Q_{ск}$  определяется как

$$Q_{ск}(Q_{кУ}) = \sqrt{\bar{Q}_n(Q_{кУ})^2 + \bar{Q}_c(Q_{кУ})^2 + D(Q_{кУ}^a)}. \quad (10)$$

На основании этих параметров можно выполнять оптимизационные расчеты установленной мощности КУ с автоматическим регулятором, поддерживающим заданный  $\cos\phi$ , и устройств, мощность которых изменяется программно в суточном цикле.

Для определения параметров тарифных зон, позволяющих стимулировать потребителя к смещению производственного цикла в направлении снижения максимума совмещенной нагрузки, используется математическая модель, характеризующая изменение мощности  $\delta P$  на границах тарифной зоны:

$$\delta P(t_n, T_z) = p(t_n) - p(t_n + T_z), \quad (11)$$

где  $t_n$ ,  $T_z$  – соответственно начальный момент и продолжительность тарифной зоны, ч.

Исследование выражения (10) на экстремумы позволяет определить такие значения  $t_n$  и  $T_z$ , при которых смещение графика нагрузки приводит к наибольшему изменению энергии внутри тарифной зоны, а следовательно, и ее стоимости для потребителя.

Зависимость тарифа от времени  $k(t)$  на суточном интервале имеет кусочно-постоянный характер. При этом суточный период  $T$  разбивается на  $n$  штрафных и  $m$  льготных зон с соответствующими тарифными коэффициентами штрафного  $K_i^{um}$  ( $i = 1, n$ ) и льготного  $K_j^{zl}$  ( $j = 1, m$ ) изменения базового тарифа.

Изменение стоимости электроэнергии  $\Delta\Pi$  при смещении ГН на интервал  $\tau$  будет определяться величиной изменения энергии внутри тарифных зон:

$$\Delta\Pi(\tau) = \sum_{i=1}^n K_i^{um} \cdot \int_{t_{ij}}^{t_{ij}+\tau} \frac{\delta P(t, Tz_i)}{Wc} dt - \sum_{j=1}^m K_j^{zl} \cdot \int_{t_{ij}}^{t_{ij}+\tau} \frac{\delta P(t, Tz_j)}{Wc} dt, \quad (12)$$

где  $Wc$  – суточный расход электроэнергии.

Выражение (12), аппроксимированное некоторой функцией с помощью методов регрессионного анализа, может использоваться для определения оптимальных смещений во времени производственных циклов электрооборудования.

**Третья глава** посвящена оптимизации производственных циклов промышленных предприятий при расчетах за электроэнергию по дифференцированному тарифу.

Для экономического стимулирования отдельных потребителей-регуляторов к смещению производственных циклов в направлении снижения максимума совмещенной нагрузки предложен способ определения тарифных зон штрафного и льготного потребления электроэнергии, заключающийся в следующем:

- по графику нагрузки потребителя-регулятора необходимо построить функцию (11) изменения мощности  $\delta P(t_n, Tz)$  в области допустимых значений  $t_n$  и  $Tz$ ;

- из множества координат экстремумов поверхности  $\delta P(t_n, Tz)$  выбрать такие, при которых суммарное изменение мощности  $\delta P_{\Sigma}$  на границах предполагаемых тарифных зон будет максимальным. При этом необходимо соблюдать условие «непересечения» тарифных зон во времени.

Для оптимизации производственных циклов технологических объектов внутри предприятия предложена экономико-математическая модель, отражающая динамику затрат на электроэнергию  $\Delta\Pi_{\Sigma}$  при смещении во времени отдельных производственных циклов, в основе которой лежит выражение (12), аппроксимированное полиномом третьей степени:

$$\Delta\Pi_{\Sigma}(\tau_i) = \sum_{i=1}^n \left( b0_i + b1_i \cdot \tau_i + b2_i \cdot \tau_i^2 + b3_i \cdot \tau_i^3 \right), \quad (13)$$

где  $\tau_i$  – величина смещения во времени производственного цикла  $i$ -го объекта;  $b_0, b_1, b_2, b_3$  – коэффициенты регрессии при соответствующих степенях  $\tau_i$ .

На рис. 1 приведены зависимости изменения затрат на электроэнергию при смещении производственных циклов цехов НКХП.

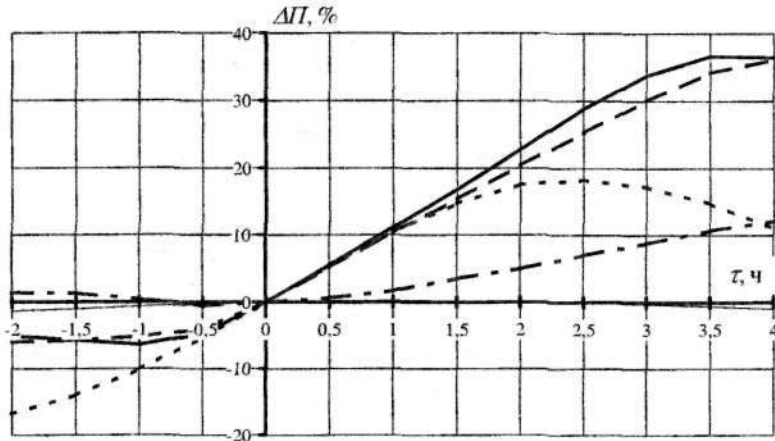


Рис. 1. Динамика затрат на электроэнергию при смещении производственных циклов технологических объектов НКХП:

— — — цех № 1; — · — цех № 2; ..... цех № 3;  
 ————— цех № 4; ————— цех № 5

На поиск максимума выражения (13) накладываются ограничения, обусловленные областью исследования суточного графика объекта, допустимым временем ресинхронизации производственных циклов отдельных объектов, дискретностью значений самих сдвигов:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta P_{\Sigma}(\tau_i) = \sum_{i=1}^n P_{\text{цех}_i} \cdot (b_0 + b_1 \cdot \tau_i + b_2 \cdot \tau_i^2 + b_3 \cdot \tau_i^3) \rightarrow \max, \\ T_{\min_i} - T\delta_i \leq \tau_i \leq T_{\max_i} - T\delta_i, \\ \tau_i = m_i \cdot \Delta t_i, \\ \tau_i - \tau_j \leq T r_{ij}, \quad i \neq j, \\ i = \overline{1, n}; j = \overline{1, n}; m_i - \text{целые}, \end{array} \right. \quad (14)$$

где  $P_{цех*i*}$  – доля  $i$ -го цеха в суммарных затратах на электропотребление предприятия;  $Tr_{ij}$  – допустимое время ресинхронизации производственных циклов  $i$ -го и  $j$ -го объектов;  $\Delta t_i$  – шаг смещения для  $i$ -го объекта;  $m_i$  – количество шагов смещения.

Модель динамики затрат на электроэнергию была использована для определения оптимальных смещений производственных циклов электрооборудования цехов НКХП.

В табл. 1 приведены исходные данные и результаты расчета оптимальных смещений производственных циклов НКХП. Величина снижения затрат при оптимизации во времени производственных циклов пяти цехов предприятия составляет 15,3 %. Поиск оптимального решения выполнялся в программе EXCEL с помощью надстройки «Поиск решения».

Таблица 1

Результаты оптимизации производственных циклов

Параметр	Цех № 1	Цех № 2	Цех № 3	Цех № 4	Цех № 5	НКХП
Исходные данные						
$T_0, \text{час}$	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00	
$T_{\min}, \text{час}$	6:00	6:00	6:00	8:00	8:00	
$T_{\max}, \text{час}$	10:00	10:00	10:00	8:00	9:00	
$\Delta t, \text{мин}$	15	15	15	15	15	
$P(\tau), \%$	24,85	40,01	20,28	4,16	10,70	
Результаты расчета						
$m$	16	7	11	15	16	
$\tau, \text{час}$	4,0	1,75	2,75	4	4	
$T_0 + \tau, \text{час}$	12:00	9:45	10:45	11:45	12:00	
$\Delta P_{цех}(\tau), \%$	36,32	0,18	18,53	36,87	12,36	
$\Delta P(\tau), \%$	9,03	0,07	3,76	1,54	1,32	

Для решения задач повышения эффективности работы систем электроснабжения необходимы статистические данные по графикам нагрузки как всего предприятия, так и его отдельных потребителей. Рассмотрена структура информационной базы параметров электропотребления и создано программное обеспечение для ПЭВМ, работающей в составе системы автоматизированного учета электроэнергии на базе комплекса технических средств СИМЭК, формирующей такую базу данных.

В четвертой главе рассматриваются способы снижения затрат промышленного предприятия на электроэнергию за счет оптимального управления источниками реактивной мощности в узле нагрузки с синхронными двигателями, а также в многоуровневых системах электроснабжения.

Математическая постановка задачи отыскания оптимальных реактивных нагрузок  $\alpha_i$  для группы СД по критерию минимума затрат при соблюдении условия баланса реактивных мощностей имеет следующий вид:

$$\begin{cases} 3'(\alpha_i, Q_c) = \sum_i^n (A_i \cdot \alpha_i^2 + tg \delta_{c\partial i} \cdot \alpha_i) + tg \delta_c \cdot Q_c \rightarrow \min, \\ Q_n = \sum_i^n \alpha_i \cdot Q_{ном i} + Q_c, \end{cases} \quad (15)$$

где  $3'$  – затраты в виде дополнительных потерь активной мощности, кВт;  $\alpha_i$  – коэффициент загрузки по реактивной мощности  $i$ -го СД;  $A_i$ ,  $tg \delta_{c\partial i}$  – показатели потерь в синхронном двигателе, кВт, кВт/квар;  $tg \delta_c$  – показатель потерь активной мощности для энергосистемы, кВт/квар;  $Q_c$  – реактивная мощность потребляемая из сети, квар;  $Q_n$  – реактивная нагрузка, квар;  $Q_{ном i}$  – номинальная реактивная мощность  $i$ -го СД, квар.

С учетом ограничений на потребление реактивной мощности из энергосистемы оптимальные реактивные нагрузки  $\alpha_i^{opt}$  для группы СД и реактивная мощность от энергосистемы  $Q_c^{opt}$  определяются следующим выражением:

$$\begin{cases} Q_c^{opt} = Q_a - \sum d_i \cdot (tg \delta_c - tg \delta_{c\partial i}), \\ \alpha_i^{opt} = (tg \delta_c - tg \delta_{c\partial i}) \cdot \frac{d_i}{Q_{ni}} \quad \text{при } 0 < Q_c^{opt} < Q_3, \\ \alpha_i^{opt} = \left( \frac{Q_a + \sum d_i \cdot tg \delta_{c\partial i}}{\sum d_i} - tg \delta_{c\partial i} \right) \cdot \frac{d_i}{Q_{ni}} \quad \text{при } Q_c^{opt} < 0, \\ \alpha_i^{opt} = \left( \frac{Q_3 + \sum d_i \cdot tg \delta_{c\partial i}}{\sum d_i} - tg \delta_{c\partial i} \right) \cdot \frac{d_i}{Q_{ni}} \quad \text{при } Q_c^{opt} > Q_3, \\ d_i = \frac{Q_{ном i}^2}{2 \cdot A_i}; \quad i = \overline{1, n}. \end{cases} \quad (16)$$

Оптимизация режимов работы СД как источников реактивной мощности при оперативном управлении неразрывно связана с контролем режима реактивной мощности в узле нагрузки, составом работающих СД и контролем действующих тарифов. Реализовать оптимальное управление работой СД возможно с помощью автоматизированной системы на базе микропроцессорного контроллера, управляющей возбуждением СД в реальном времени (рис. 2). Испытания опытных образцов такой системы,

проведенные на НС «Новозыбков» нефтепровода «Дружба» и НС «Лисичанск» Приднепровского управления магистральных нефтепроводов, показали высокую эффективность их работы при управлении реактивной мощностью в узле нагрузки.

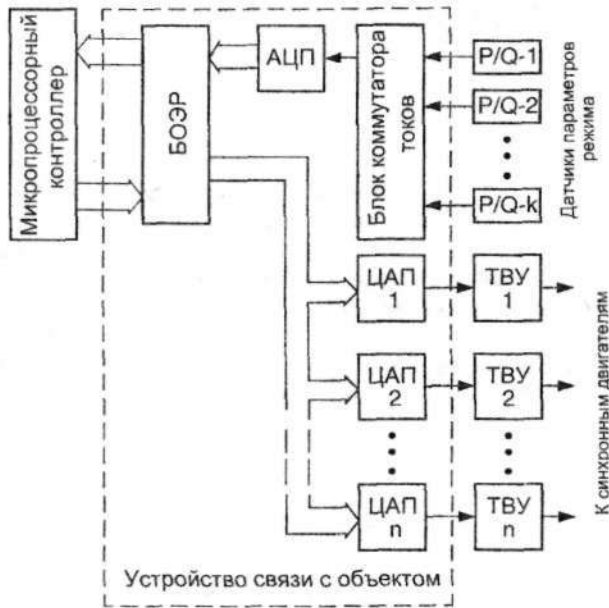


Рис. 2. Структурная схема автоматизированной системы управления реактивной мощностью синхронных двигателей: БОЭР – блок оптоэлектронной развязки; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь; ТВУ – тиристорное возбуждающее устройство; P/Q – датчик активной/реактивной мощности

В табл. 2 приведены данные по затратам, обусловленным потреблением реактивной мощности насосной станции «Гомель» нефтепровода «Дружба» за один месяц, и их значение в случае оптимального управления возбуждением СД. Эффект достигается за счет исключения штрафных санкций, снижения потребления реактивной мощности и оптимизации работы СД как источников реактивной мощности.

При оптимизации режимов работы источников реактивной мощности для промышленных систем электроснабжения необходимо учитывать многоуровневый характер схемы электроснабжения.

Таблица 2

Стоимость потребленной реактивной мощности насосной станции

Параметры электропотребления	Кол-во, квар, квар·ч	Тариф, USD/квар.ч, USD/квар	Сумма, USD
<i>Экономические значения мощности и энергии</i>			
Реактивная мощность	1 200	0,0748	90
Реактивная энергия	600 000	0,00058	347
<i>Всего за экономическое потребление</i>			437
<i>Свыше экономических значений</i>			
Реактивная мощность	1 383	0,22448	310
Реактивная энергия	547 896	0,00174	952
Генерация	385	0,00579	2
<i>Всего штрафных санкций</i>			1 265
<i>Фактические значения мощности и энергии</i>			
Реактивная мощность	2 583		400
Реактивная энергия	1 147 896		1 299
Генерация	385		2
<i>Всего за реактивную энергию и мощность</i>			1 702
<i>Затраты при оптимальном управлении</i>			213
<i>Экономический эффект</i>			1489

Для решения данной задачи используется следующая математическая модель, описывающая затраты предприятия, обусловленные потреблением реактивной мощности, потерями в линиях и КУ, а также стоимостью активной и реактивной электроэнергии. С учетом условия баланса реактивных мощностей для каждого узла, содержащего  $k$  ветвей, математическая постановка задачи имеет следующий вид:

$$\begin{cases} Z'(Q_{ij}) = \sum_{i=1}^M a_{i_i} \cdot Q_{i_i}^2 + \sum_{j=1}^K (a_j \cdot Q_{K_j}^2 + tg \delta_j \cdot Q_{K_j}) \rightarrow \min, \\ \sum_{k=1}^{L_n} (Q_{k_n} + Q_n - Q_n) = 0; \quad n = \overline{1, N}, \end{cases} \quad (17)$$

где  $a_{i_i}$  – удельные квадратичные потери в  $i$ -й ветви, кВт/квар<sup>2</sup>;  $Q_{i_i}$  – реактивная мощность в  $i$ -й ветви, квар;  $a_j, tg \delta_j$  – удельные квадратичные и линейные потери в  $j$ -м источнике, соответственно, кВт/квар<sup>2</sup> и кВт/квар.

Вектор оптимальных значений реактивных мощностей источников  $Q_n$  и потоков реактивной мощности в ветвях сети определяется как:



$$\begin{bmatrix} Q_6 \\ Q_u \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \cdot [A_6] & 0 & m^m \\ 0 & 2 \cdot [A] & K^m \\ m & K & 0 \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} 0 \\ -tg\delta \\ Q_u \end{bmatrix}, \quad (18)$$

где  $[A_6]$  – диагональная матрица удельных приростов издержек на потери в электрической сети;  $[A]$  – диагональная матрица удельных приростов потерь в СД;  $m$  – матрица соединений ветвей в узлах сети;  $K$  – матрица подключений источников реактивной мощности к узлам сети;  $Q_6$  – столбец реактивных мощностей в ветвях сети;  $Q_u$  – столбец реактивных мощностей КУ;  $tg\delta$  – столбец удельных потерь в КУ;  $\lambda$  – столбец неопределенных множителей Лагранжа.

В главе также рассмотрен способ оптимизации установленной мощности БСК в узле нагрузки, оснащенных автоматическим регулятором, поддерживающим заданный  $\cos\phi$ , и управляемых программно по критерию минимума затрат:

$$Z = Z_{ком} + Z_{экс} + \frac{Z_k}{Tок}, \quad (19)$$

где  $Z_{ком}$  – коммерческие затраты предприятия на покупку реактивной мощности и энергии в энергосистеме, руб;  $Z_{экс}$  – затраты, обусловленные эксплуатацией БСК и режимом реактивной мощности, руб;  $Z_k$  – капитальные затраты на БСК, руб;  $Tок$  – период окупаемости устанавливаемых БСК, мес.

Коммерческие затраты предприятия  $Z_{ком}$  определяются тарифом на реактивную мощность и энергию и могут быть представлены как

$$Z_{ком} = \left[ (\bar{Q}_n - \bar{Q}_e \cdot K_{ш}) + (Q_e + Q_{ш} \cdot K_{ш}) \cdot \frac{Cp1}{Tpn \cdot Cp} \right] \cdot Tpn \cdot Cp, \quad (20)$$

где  $Cp1$ ,  $Cp$  – основная и дополнительная ставки тарифа на реактивную энергию, руб/квар и руб/квар·ч;  $K_{ш}$  – штрафной коэффициент к тарифным ставкам для энергии и мощности, превышающих экономические значения;  $\bar{Q}_n$ ,  $\bar{Q}_e$  – средняя мощность за расчетный период соответственно при потреблении и генерации реактивной мощности, квар;  $Q_e$ ,  $Q_{ш}$  – экономическое значение реактивной мощности и значение мощности, превышающей его в часы максимума энергосистемы, квар;  $Tpn$  – расчетный период, ч.

Затраты, обусловленные потерями активной мощности в самих БСК и потерями в элементах распределительной сети от ее протекания  $Z_{экс}$ , определяются как

$$З_{экс} = C_a \cdot T_{пр} \cdot \left( \frac{(\bar{Q}_n + \bar{Q}_z)^2 \cdot K_\phi^2}{S_{тр}^2} \cdot \Delta P_{кз} + tg \delta \cdot (\bar{Q}_n - \bar{Q}_n + \bar{Q}_z) \right), \quad (21)$$

где  $K_\phi$  – коэффициент формы графика реактивной нагрузки;  $\bar{Q}_n$  – средняя реактивная нагрузка за расчетный период, квар;  $tg \delta$  – тангенс угла диэлектрических потерь в БСК, кВт/квар;  $\Delta P_{кз}$  – потери короткого замыкания трансформатора, кВт;  $S_{тр}$  – номинальная мощность трансформатора, кВА;  $C_a$  – стоимость единицы потерь активной электроэнергии, руб/кВт·ч.

Капитальные затраты  $З_k$  на устанавливаемые БСК определяются по удельной стоимости 1 квара мощности БСК:

$$З_k = \left( C_{yd}^a \cdot Q_{ку_i}^a + C_{yd}^u \cdot Q_{ку_i}^u \right), \quad (22)$$

где  $C_{yd}^a$  и  $C_{yd}^u$  – удельная стоимость установки БСК с автоматическим регулятором и БСК управляемых программно в суточном цикле, руб/квар.

С использованием стохастических моделей параметров реактивной мощности были выполнены оптимизационные расчеты установленной мощности БСК в распределительной сети 6/0,4 кВ НГДУ «Речицанефть» и НКХП.

По результатам расчетов для НГДУ «Речицанефть» было принято решение об индивидуальной компенсации реактивной мощности электродвигателей насосных агрегатов нефтедобычи мощностью от 18 до 55 кВт, что позволяет снизить затраты на электроэнергию за счет снижения потерь в распределительной сети на 2,4-2,8 %, что эквивалентно экономии электроэнергии 1,08-1,26 млн кВт·ч в год.

Оптимизация структуры установленной мощности КУ для НКХП позволяет снизить затраты на компенсацию реактивной мощности на 16 %.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с поставленной целью для проверки выдвинутой гипотезы в диссертации получены следующие основные результаты:

1. На основании статистических данных показано, что для достижения максимально возможного выравнивания совмещенной нагрузки необходимо для части потребителей (регуляторов) устанавливать индивидуальные тарифные зоны. Предложен способ определения тарифных зон суток дифференцированного тарифа, максимально стимулирующих потребителя смещать производственные циклы в направлении снижения максимума совмещенной нагрузки энергосистемы [1, 3, 5, 11].

2. Для снижения стоимости потребляемой электроэнергии разработан способ определения оптимальных смещений производственных циклов электрооборудования промышленного предприятия по критерию минимума

ма затрат на электроэнергию [9] с учетом ограничений, обусловленных технологическими взаимосвязями, позволяющий снизить стоимость потребляемой электроэнергии до 15 % по отношению к исходным режимам.

3. Разработана структура базы данных и программного комплекса автоматизированной системы контроля электропотребления для информационного обеспечения задач оптимизации режимов электропотребления промышленных предприятий [8, 13, 15].

4. Исследована эффективность компенсации реактивной мощности нагрузки предприятий и установлено, что оптимизация режимов реактивной мощности в узлах нагрузки позволяет существенно снизить плату за потребленную электроэнергию и уменьшить ее потери в системе электроснабжения [2, 7, 12].

5. Разработан способ оптимального управления источниками реактивной мощности в системах электроснабжения промышленных предприятий по критерию минимума затрат на электроэнергию. Алгоритм оптимизации использован при разработке программного обеспечения автоматизированной системы управления реактивной мощностью синхронных двигателей. Система внедрена на объектах предприятий транспорта нефти [6, 10, 14].

6. Разработаны стохастическая модель потребления реактивной мощности в узле нагрузки и способ определения оптимального соотношения установленных мощностей БСК с автоматическими регуляторами, поддерживающими заданный коэффициент мощности  $\cos\phi$ , и БСК, управляемых программно [4], позволяющий снизить затраты потребителя на установку КУ.

### **СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Прокопчик В.В., Сычев А.В. Определение тарифных зон суток для дифференцированных тарифов на электроэнергию // Энергетика (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2002. – № 4. – С. 25-33.

2. Прокопчик В.В., Сычев А.В. Компенсация реактивной мощности нагрузки в условиях рыночных отношений // Электрика. – 2001. – № 6. – С. 19-25.

3. Сычев А.В. Об экономическом стимулировании потребителей к маневрированию нагрузкой // Электрика. – 2003. – № 2. – С. 41.

4. Сычев А.В. Стохастическое моделирование потребления реактивной мощности в узле нагрузки // Вестник ГГТУ. – 2003. – № 2. – Гомель: Изд-во ГГТУ им. П.О. Сухого, 2003. – С. 19-26.

5. Прокопчик В.В., Сычев А.В. Эффективность применения дифференцированных тарифов на электроэнергию // Энергоэффективность. – 2000. – № 1. – С. 5-7.

6. Прокопчик В.В., Сычев А.В. Оптимизация режима реактивной мощности узла нагрузки с помощью синхронных двигателей //Электрификация металлургических предприятий Сибири: Сб. науч. тр. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та, 2001. – Вып. 10. – С. 111-121.

7. Сычев А.В. Управление реактивной мощностью промышленного предприятия //Технические ВУЗы – Республике: Материалы междунар. 52-й науч.-техн. конф. профессоров, преподавателей, научных работников, аспирантов и студентов БГПА: В 7 ч. – Минск, 1997. – Ч. 1. – С. 20.

8. Сычев А.В. Автоматизация контроля за электропотреблением на промышленном предприятии //Современные проблемы машиноведения: Материалы междунар. науч.-техн. конф. /Бел. инж. акад. ГПИ им. П.О. Сухого. – Гомель, 1996. – С. 192-194.

9. Сычев А.В. Оптимизация электропотребления промышленного предприятия в условиях многотарифности //Современные проблемы машиноведения: Материалы междунар. науч.-техн. конф. /Бел. инж. акад. ГПИ им. П.О. Сухого. – Гомель, 1998. – С. 115-116.

10. Сычев А.В. Управление источниками реактивной мощности промышленного предприятия //Современные проблемы машиноведения: Материалы междунар. науч.-техн. конф. /Бел. инж. акад. ГПИ им. П.О. Сухого. – Гомель, 1998. – С. 116-117.

11. Сычев А.В. Оптимизация интервалов режимных зон для дифференцированных тарифов на электроэнергию //Материалы международной науч.-техн. конф. «Энергосбережение. Электроснабжение. Автоматизация». – Гомель: Изд-во ГГТУ им. П.О. Сухого, 2001. – С. 16-18.

12. Сычев А.В. Оптимизация режимов потребления реактивной мощности //Материалы семинара «Организация и проведение энергетического обследования субъектов хозяйствования Республики Беларусь». – Гомель, Изд-во НПО «Ратон», 2001. – С. 42-56.

13. Сычев А.В. Современные системы учета топливно-энергетических ресурсов //Материалы семинара «Организация и проведение энергетического обследования субъектов хозяйствования Республики Беларусь». – Гомель: Изд-во НПО «Ратон», 2001. – С. 100-111.

14. Сычев А.В. Управление возбуждением синхронных двигателей с учетом их реальных характеристик. Кибернетика электрических систем. Электроснабжение промышленных предприятий: Тез. докл. науч. сем., Гомель, 19-22 нояб. 1991 г. /Гом. политех. ин-т. – Гомель, 1991. – С. 16-17.

15. Сычев А.В., Шуляков Ю.А., Ключевой Г.П. Программное обеспечение для АСУЭ на промышленном предприятии //Тез. докл. на науч. конф. в МЭИ. – М., 1995. – С. 26-27.

**РЕЗЮМЕ***Сычев Александр Васильевич***Оптимизация режимов работы электрооборудования и источников реактивной мощности для снижения затрат промышленных предприятий на электроэнергию**

Оптимизация, управление, реактивная мощность, источник реактивной мощности, тарифные зоны, смещение во времени, производственный цикл, затраты на электроэнергию.

Объект исследования – режимы работы электрооборудования и источников реактивной мощности в системе электроснабжения промышленного предприятия.

Предмет исследования – способы и средства управления работой электрооборудования и источниками реактивной мощности в системе электроснабжения промышленного предприятия, их связь с затратами на электроэнергию.

Цель работы – разработка новых и совершенствование известных способов оптимизации режимов работы электрооборудования и источников реактивной мощности в системах электроснабжения промышленных предприятий, обеспечивающих снижение затрат на электроэнергию при сохранении других технико-экономических показателей производства неизменными.

Методологической основой исследований являются системный подход, математическое моделирование, натурный и вычислительный эксперименты.

Разработан способ определения оптимальных смещений производственных циклов промышленного предприятия во времени по критерию минимума затрат на электроэнергию. Предложен способ определения тарифных зон, стимулирующих потребителя к смещению производственных циклов в направлении снижения максимума совмещенной нагрузки. Разработана математическая модель параметров потребления реактивной мощности в узле нагрузки при установке компенсирующих устройств с различными видами управления и способ оптимизации установленной мощности этих устройств по критерию минимума затрат. Разработан способ управления источниками реактивной мощности в системе электроснабжения предприятия.

Результаты работы использованы при оптимизации производственных циклов Новобелицкого КХП, для управления возбуждением синхронных двигателей насосных станций, управления реактивной мощностью ПДУ «Речизанефть» и расчета оптимальных режимов реактивной мощности Белорусского металлургического завода.

Область применения результатов диссертации – электроэнергетика, системы электроснабжения промышленных предприятий.

## РЭЗЮМЭ

*Сычоў Аляксандр Васільевіч*

**Аптымізацыя рэжымаў работы электраабсталявання і крыніц  
рэактыўнай магутнасці для зніжэння страт прамысловых  
прадпрыемстваў на электраэнергію**

Аптымізацыя, кіраванне, рэактыўная магутнасць, крыніца рэактыўнай магутнасці, тарыфныя зоны, змяшчэнне ў часе, вытворчы цыкл, страты на электраэнергію.

Аб'ект даследавання – рэжымы работы тэхналагічнага электраабсталявання і крыніц рэактыўнай магутнасці ў сістэме электразабеспячэння прамысловага прадпрыемства.

Прадмет даследавання – спосабы і сродкі кіравання работай тэхналагічнага электраабсталявання і крыніц рэактыўнай магутнасці ў сістэме электразабеспячэння прамысловага прадпрыемства, іх сувязь са стратамі на электраэнергію.

Мэта працы – распрацоўка новых і ўдасканаленне вядомых спосабаў аптымізацыі рэжымаў работы тэхналагічнага электраабсталявання і крыніц рэактыўнай магутнасці ў сістэме электразабеспячэння прамысловых прадпрыемстваў, якія забяспечваюць зніжэнне страт на электраэнергію пры захаванні іншых тэхніка-эканамічных паказчыкаў вытворчасці п'ямэннымі.

Метадалагічнай асновай даследаванняў з'яўляюцца сістэмны падыход, матэматычнае мадэляванне, натурны і вылічальны эксперыменты.

Распрацаваны спосаб вызначэння аптымальных змяшчэнняў вытворчых цыклаў прамысловага прадпрыемства ў часе па крытэрыю мінімуму страт на электраэнергію. Прапанаваны спосаб вызначэння тарыфных зон, якія стымулююць спажываць да змяшчэння вытворчых цыклаў у напрамку зніжэння максімуму сумешчанаі нагрузкі. Распрацавана матэматычная мадэль параметраў спажывання рэактыўнай магутнасці ў вузле нагрузкі пры ўстаноўцы кампенсуючых прыстававанняў з рознымі спосабамі кіравання, якая дазваляе аптымізаваць устаноўленую магутнасць гэтых прыстававанняў па крытэрыю мінімуму страт. Распрацаваны спосаб кіравання крыніцамі рэактыўнай магутнасці ў сістэме электразабеспячэння прадпрыемства.

Вынікі працы выкарыстаны пры аптымізацыі вытворчых цыклаў Навабеліцкага КХП, для кіравання ўзбуджэннем сінхронных рухавікоў насосных стапшый, кіравання рэактыўнай магутнасцю НГДУ «Речьшанафта» і разліку аптымальных рэжымаў рэактыўнай магутнасці Беларускага металургічнага завода.

Галіна выкарыстання вынікаў дысертацыі – электраэнергетыка, сістэмы электразабеспячэння прамысловых прадпрыемстваў.

**SUMMARY***Sychev Aleksandr Vasilievich***Optimizing Operating Modes of Electrical Equipment and Reactive Power Sources for the Reduction of Industrial Enterprise Costs of Electric Energy**

**Key words-** optimization, control, reactive power, source of reactive power, rate territory, and time shift, production cycle, electric energy costs.

**Research object – operating modes of technological equipment and reactive power sources in the system of industrial enterprise electric power supply.**

**Research subject – methods and means of technological electrical equipment and reactive power source control in the system of industrial enterprise electric power supply, their relation to electric energy costs.**

**Research objective – developing novel and improving known methods of optimization of technological electrical equipment operating modes and reactive power sources in the system of industrial enterprise electric power supply enabling to reduce electric energy costs keeping other technical-economic indexes unchanged.**

Methodological basis of the studies is represented by a system approach, mathematic modeling, full-scale and computational experiments.

The method for defining optimum production cycle time shifts according to the criterion of minimum electric energy costs has been developed. A method of defining rate territories stimulating the consumer to shift production cycles

in order to reduce overlap loads maximum has been proposed. A mathematical model has been developed of the parameters of reactive power consumption in the load node with the use of compensation devices featuring various methods of control and a method of optimizing set power of these devices according to the criterion of minimum costs has been worked out. A method of reactive power source control has been developed for the system of the enterprise electric power supply.

The results obtained have been used for optimizing production cycles of Novobelitsa Bakery Products Industrial Complex, pump station synchronous motor excitation control, reactive power control at the Oil and Gas Production Department "Rechtsanefit" and for calculating optimum reactive power modes at the Belarus Metallurgy Plant.

**Field of application – electric power engineering, electric power supply of industrial enterprises.**



**Сычев Александр Васильевич**

**ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ  
ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ И ИСТОЧНИКОВ  
РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ  
ЗАТРАТ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ НА  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ**

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Автореферат диссертации на соискание  
ученой степени кандидата технических наук

Редактор Л.Ф. Тешлякова  
Компьютерная верстка Н.Б. Козловская

Подписано в печать 22.05.2003.  
Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».  
Усл. печ. л. 1,39. Уч. - изд. л. 1,6. Тираж 120 экз. Изд. № 61.  
Заказ №173.

Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П.О. Сухого».  
Лицензия ЛВ № 399 от 12.06.2001.  
246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.

Отпечатано на ризографическом оборудовании  
Учреждения образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П.О. Сухого».  
Лицензия ЛП № 114 от 19.12.2002.  
246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.