

На правах рукописи

Богачев Василий Сергеевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ И СИСТЕМ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

Специальность 05.09.03 — Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург 2011

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина) на кафедре Электротехнологической и преобразовательной техники (ЭТПТ).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
кафедры ЭТПТ СПбГЭТУ (ЛЭТИ)
Кошелёв Пётр Александрович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
кафедры Систем автоматического управления
(САУ) СПбГЭТУ (ЛЭТИ)
Поляхов Николай Дмитриевич;
кандидат технических наук, доцент
Санкт-Петербургского государственного
заочного технического университета (СЗТУ)
Ермолин Сергей Александрович.

Ведущая организация: Санкт-Петербургский национальный
исследовательский университет
информационных технологий,
механики и оптики (ИТМО)

Защита диссертации состоится «28» декабря 2011 года в 18.00 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.238.05 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, С.-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан «25» ноября 2011 года.

Ученый секретарь совета по защите
докторских и кандидатских диссертаций
Д 212.238.05, к. т. н.



М. П. Белов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Вопросы повышения эффективности использования энергетических ресурсов, в том числе электрической энергии, имеют принципиальное значение для устойчивого развития экономик и роста внутреннего валового продукта (ВВП) стран. На принятие действенных мер, обеспечивающих эффективное использование электрической энергии, направлена работа многих ученых и научно-исследовательских организаций по всему миру.

Актуальность темы обусловлена, главным образом, современными социально-экономическими тенденциями, приводящими к росту общей энергоемкости промышленных и бытовых потребителей, связанной, в частности, с количественным распространением различных электротехнических комплексов и систем, качественными изменениями режимов и графиков потребления электрической мощности, а также с увеличением протяженности магистральных, промышленных и бытовых электрических сетей.

В результате отмеченных тенденций, возникает недостаток генерируемой электростанциями мощности, появляется необходимость строительства дополнительных станций, комплексов автономной или систем распределенной генерации. Это сопряжено с большими экономическими затратами и значительными экологическими ущербами, которые можно минимизировать, а в некоторых случаях и полностью исключить, если обеспечить повышение энергоэффективности электротехнических комплексов и систем электроснабжения.

Под энергоэффективностью электротехнических комплексов и систем электроснабжения в общем случае понимается рациональное и эффективное использование мощности, потребляемой от источников электроэнергии, при сохранении параметров качества сети, питающей промышленных и бытовых потребителей.

Цель работы и задачи исследования. Цель работы заключается в разработке методов и средств повышения энергоэффективности электротехнических комплексов и систем электроснабжения за счет минимизации потерь при передаче мощности от источников электроэнергии к потребителям, а также за счет повышения показателей эффективности электропотребления и качественных показателей электроэнергии питающей сети.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Предложить методику анализа параметров, характеризующих специфику потребления мощности при работе электротехнических комплексов и систем электроснабжения различного назначения.
2. Предложить критерий энергоэффективности электротехнических комплексов и систем электроснабжения, а также методику его измерения и расчета.
3. Разработать методику повышения пропускной способности ЛЭП переменного тока на основе принципа элементарной параметрической адаптации.
4. Предложить методы и разработать устройства адаптивной компенсации реактивной мощности и стабилизации параметров качества электроэнергии, обеспечивающие выполнение требований к энергетическим показателям

электротехнических комплексов и систем электроснабжения, в соответствии с предложенным критерием энергоэффективности.

Методы исследований. Поставленные задачи решались путем проведения теоретических и экспериментальных исследований. В диссертации использованы основные положения теоретической электротехники, аппараты математического анализа, тригонометрии, теории вероятностей, линейной алгебры, современные методы и программные средства компьютерного моделирования электротехнических комплексов и динамических систем: Matlab-Simulink, MATHCAD.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методика анализа характеристик сигналов и параметров потребления мощности в электрических цепях по мгновенным значениям напряжений и токов.
2. Коэффициент энергоэффективности электротехнических комплексов и систем электроснабжения и методика его измерения.
3. Методика повышения пропускной способности ЛЭП переменного тока с реализацией принципа элементарной параметрической адаптации.
4. Адаптивные методы и реализующие их устройства компенсации реактивной мощности и стабилизации параметров качества электроэнергии, обеспечивающие повышение энергоэффективности по выбранному критерию.

Научная новизна диссертационной работы:

1. Предложена методика анализа и расчета характеристик сигналов и параметров потребления мощности в электрических цепях по мгновенным значениям напряжений и токов, которая с высокой точностью отражает реальные электроэнергетические процессы.
2. Предложен общий критерий показателей эффективности электропотребления и параметров качества электроэнергии, в виде коэффициента энергоэффективности электротехнических комплексов и систем электроснабжения, а также методика его измерения.
3. Предложена методика повышения энергоэффективности и пропускной способности ЛЭП переменного тока на основе принципа элементарной параметрической адаптации.
4. Разработаны и реализованы методы компенсации реактивной мощности и стабилизации параметров качества электроэнергии, обеспечивающие повышение энергоэффективности по предложенному критерию.

Достоверность научных результатов диссертационной работы, подтверждается опытными данными, полученными при помощи средств экспериментального компьютерного моделирования электротехнических комплексов и динамических систем, и практически полным совпадением этих данных с результатами расчетов при использовании известных аналитических выражений.

Практическая ценность работы.

1. Методика анализа характеристик сигналов и параметров потребления мощности в электрических цепях, по мгновенным значениям напряжений и токов, предложенная в диссертационной работе, может быть использована в системах управления и контроля, в современных устройствах компенсации реактивной

мощности и стабилизации параметров качества электроэнергии, а также в различных цифровых контрольно-измерительных приборах.

2. Предложенный коэффициент энергоэффективности электротехнических комплексов и систем электроснабжения, а также методика его измерения по мгновенным значениям напряжений и токов, могут найти широкое применение в цифровых измерительных приборах, устройствах управления, контроля и визуализации в реальном времени, в системах многопараметрической диагностики электроэнергетических систем (ЭЭС).

3. Методика и средства повышения энергоэффективности ЛЭП, предложенные в диссертационной работе, могут применяться при проектировании и строительстве ЛЭП различной протяженности, а также в комплексных мероприятиях по повышению их пропускной способности и минимизации потерь.

4. Разработанные методы и устройства адаптивной компенсации реактивной мощности и стабилизации параметров качества электроэнергии, могут использоваться в разнообразных электротехнических комплексах и системах электроснабжения промышленных и бытовых потребителей мощности.

Реализация и внедрение результатов диссертационной работы. Полученные в диссертационной работе результаты использовались: в ЗАО «НПО «Тепломаш» (г. Санкт – Петербург), в НПФ «Вектор-Н1» ОАО «НИИ «Вектор» (г. Санкт-Петербург), в ООО «СВЧ-Радиосистемы» (г. Санкт-Петербург), в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина) внедрены в лекционные курсы и лабораторный практикум по дисциплинам: «Компьютерно-информационные технологии анализа и синтеза электротехнических комплексов» и «Силовая импульсная техника».

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на международной научно-технической конференции «Передовые технологии, материалы и оборудование в сварке и родственных процессах» (г. Санкт-Петербург 2008 г.), на XII-й международной конференции «Электромеханика, электротехнологии, электрические материалы и компоненты (МКЭЭЭ, г. Алушта 2008 г.), на 63-й и 64-й научно-технических конференциях СПбНТОРЭС им. А. С. Попова (Санкт-Петербург 2008, 2009 гг.), а также на 61 – 64 научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ «ЛЭТИ» (г. Санкт-Петербург, 2008–2011 гг.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 20 печатных работ, среди них 4 статьи в изданиях рекомендованных ВАК РФ, 8 патентов РФ и 8 работ в других изданиях.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав с выводами, заключения, списка используемой литературы и изложена на 220 листах машинописного текста.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации и дана общая характеристика выполненной работы. Сформулированы цель, основные задачи, научная новизна и практические результаты.

В первой главе рассмотрены вопросы анализа физических характеристик сигналов и параметров потребления мощности в электрических цепях.

Центральное место в этих вопросах занимают проблемы, связанные с представлением электрических колебаний в спектрально-временной области и вычислением действующих значений базовых электрических величин. Известно, что работа любой электротехнической системы определяется токами в ветвях и напряжениями в узлах цепей. В сложных электротехнических системах изменения электрических величин от времени часто отличаются как от синусоидальных, так и от периодических функций. Напряжения и токи в этом случае могут рассматриваться как модулированные во времени колебания со случайными законами изменения амплитуд, начальных фаз и основных (несущих) частот:

$$\begin{aligned} u(t) &= U(t) \cdot \sin[2 \cdot f(t) \cdot \pi \cdot t + \varphi_u(t)] \\ i(t) &= I(t) \cdot \sin[2 \cdot f(t) \cdot \pi \cdot t + \varphi_i(t)] \end{aligned} \quad (1)$$

где $U(t)$, $I(t)$ и $\varphi_u(t)$, $\varphi_i(t)$ амплитуды и начальные фазы колебаний, изменяющиеся во времени, $f(t)$ – основная частота колебаний в момент времени t .

Произвольные, модулированные во времени несинусоидальные и непериодические колебания, можно представить в спектрально-временной области в виде динамических тригонометрических рядов Фурье, аппроксимирующих разнообразные изменения колебаний (1):

$$\begin{aligned} u(t) &= U_0(t) + \sum_{k=1}^n U_k(t) \cdot \sin[2 \cdot f_3(t) \cdot k \cdot \pi \cdot t + \varphi_{uk}(t)] \\ i(t) &= I_0(t) + \sum_{k=1}^n I_k(t) \cdot \sin[2 \cdot f_3(t) \cdot k \cdot \pi \cdot t + \varphi_{ik}(t)] \end{aligned} \quad (2)$$

где $U_0(t)$, $I_0(t)$ – значения постоянных составляющих напряжения и тока в момент времени t , $U_k(t)$, $I_k(t)$ – значения амплитуд квазигармонических составляющих напряжения и тока в момент времени t , $f_3(t)$ – относительная эталонная частота разложения ряда в момент времени t , $\varphi_{uk}(t)$, $\varphi_{ik}(t)$ – значения начальных фаз квазигармонических составляющих напряжения и тока в момент времени t , k – порядок (номер) квазигармонической составляющей, n – порядок последней из учитываемых квазигармонических составляющих.

Амплитуды и начальные фазы отдельных составляющих ряда, которые являются изменяющимися во времени квазигармоническими колебаниями, могут быть найдены через квадратурные (ортогональные) проекции (реальную и мнимую части) $a(t)$ и $b(t)$ по формулам:

$$U_k(t) = \sqrt{[a_u(t)]^2 + [b_u(t)]^2} \quad (3)$$

$$I_k(t) = \sqrt{[a_i(t)]^2 + [b_i(t)]^2}$$

$$\varphi_{uk}(t) = \operatorname{arctg} \left[\frac{b_u(t)}{a_u(t)} \right] \quad (4)$$

$$\varphi_{ik}(t) = \operatorname{arctg} \left[\frac{b_i(t)}{a_i(t)} \right]$$

Ортогональные проекции $a(t)$ и $b(t)$ вычисляются при помощи интегралов:

$$a_u(t) = 2 \cdot f_3(t) \cdot \int_{t-\frac{1}{f_3(t)}}^t u(t) \cdot \cos(2 \cdot f_3(t) \cdot k \cdot \pi \cdot t) dt \quad (5)$$

$$a_i(t) = 2 \cdot f_3(t) \cdot \int_{t-\frac{1}{f_3(t)}}^t i(t) \cdot \cos(2 \cdot f_3(t) \cdot k \cdot \pi \cdot t) dt$$

$$b_u(t) = 2 \cdot f_3(t) \cdot \int_{t-\frac{1}{f_3(t)}}^t u(t) \cdot \sin(2 \cdot f_3(t) \cdot k \cdot \pi \cdot t) dt \quad (6)$$

$$b_i(t) = 2 \cdot f_3(t) \cdot \int_{t-\frac{1}{f_3(t)}}^t i(t) \cdot \sin(2 \cdot f_3(t) \cdot k \cdot \pi \cdot t) dt$$

Действующие (среднеквадратичные или эффективные) значения рассматриваемых сигналов $u(t)$ и $i(t)$ определяются выражениями:

$$U_d(t) = \sqrt{f_3(t) \cdot \int_{t-\frac{1}{f_3(t)}}^t [u(t)]^2 dt} \quad (7)$$

$$I_d(t) = \sqrt{f_3(t) \cdot \int_{t-\frac{1}{f_3(t)}}^t [i(t)]^2 dt}$$

Формулы (1-7) широко применяются при анализе сигналов и расчете электроэнергетических процессов, протекающих в электрических цепях. Показано, что правильная интерпретация физических характеристик сигналов в спектрально-временной области в виде динамических рядов Фурье и действующих значений по формулам (2-7), достижима лишь в том случае, если известна основная частота $f(t)$ колебаний (1). При помощи компьютерного моделирования в среде Matlab-Simulink проведены экспериментальные исследования и дана оценка влияния отклонений частоты $f(t)$ колебаний (1) от эталонной частоты разложения $f_3(t)$, при вычислении спектров и действующих значений сигналов по формулам (2-7). Доказано, что адекватную интерпретацию реальных физических характеристик сигналов можно получить только при

равенстве эталонной частоты разложения $f_3(t)$ и реальной частоты $f(t)$ исследуемых колебаний (1). Отклонения частоты $f(t)$ в электрических цепях и системах электроснабжения электротехнических комплексов определяются относительно медленными по сравнению с периодом несущих колебаний изменениями. В связи с глобальным характером значения основной (несущей) частоты $f(t)$, влияющей на точность и адекватность интерпретации характеристик сигналов, в работе рассмотрены современные методы определения частоты и выявлены недостатки с точки зрения времени измерений, точности и параметров входных воздействий.

Предложен способ точного и быстрого определения частоты модулированных во времени колебаний, который заключается в следующем. Произвольное, модулированное во времени колебание вида:

$$u(t) = U_m(t) \cdot \sin[2 \cdot \pi \cdot f_c(t) \cdot t + \varphi(t)] \quad (8)$$

разделяется на квадратурные составляющие относительно выбранной эталонной частоты $f_3(t)$ по формулам:

$$a_u(t) = 2 \cdot f_3(t) \cdot \int_{t - \frac{1}{f_3(t)}}^t u(t) \cdot \cos(2 \cdot f_3(t) \cdot k \cdot \pi \cdot t) dt \quad (9)$$

$$b_u(t) = 2 \cdot f_3(t) \cdot \int_{t - \frac{1}{f_3(t)}}^t u(t) \cdot \sin(2 \cdot f_3(t) \cdot k \cdot \pi \cdot t) dt \quad (10)$$

Вычисляется начальная фаза колебания (8), по формуле:

$$\varphi(t) = \arctg \left[\frac{b_u(t)}{a_u(t)} \right] \quad (11)$$

При этом начальная фаза в общем случае содержит полезную составляющую и паразитные колебания фазы, которые могут быть вызваны резко переменным характером сигнала (8). Таким образом, для начальной фазы можно записать:

$$\varphi(t) = \varphi_0(t) + \Delta\varphi(t), \quad (12)$$

где $\varphi_0(t)$ – полезная составляющая $\varphi(t)$, $\Delta\varphi(t)$ – паразитные колебания фазы $\varphi(t)$.

Синтезируется вспомогательный сигнал $h(t)$ с постоянной амплитудой:

$$h(t) = \sin[2 \cdot \pi \cdot f_3(t) \cdot t + [\varphi_0(t) + \Delta\varphi(t)]] \quad (13)$$

Производится фазовое детектирование сигнала $h(t)$. За счет этого значительно уменьшаются паразитные колебания $\Delta\varphi(t)$ и образуется сигнал $\varphi_0(t)$.

Вычисляется производная от начальной фазы колебания (13):

$$[\varphi_0(t)]' = \frac{d[\varphi_0(t)]}{dt} \quad (14)$$

Определяется знак производной и время Δt между ее экстремумами. При этом частота $f_c(t)$ колебания (8) выражается формулами:

$$f_c(t) = \frac{f_3(t) \cdot \Delta t + 1}{\Delta t}, \text{ если } [\varphi_0(t)]' < 0$$

$$f_c(t) = \frac{f_3(t) \cdot \Delta t - 1}{\Delta t}, \text{ если } [\varphi_0(t)]' > 0$$

(15)

Предложенный способ используется в системах контроля, управления и визуализации реального времени, содержащихся в ряде адаптивных компенсирующих устройств, предложенных в диссертационной работе. В первой главе приведены также выражения для анализа режимов электропотребления в электрических цепях, отражающие основные положения известного подхода О. А. Маевского о составляющих полной мощности. На основании предложенного способа измерения частоты сигналов и применении известных аналитических выражений, характеризующих режимы электропотребления, разработана и предложена методика анализа характеристик сигналов и параметров потребления мощности в электрических цепях по мгновенным значениям напряжений и токов. Предложенная методика является удобным средством анализа электрических цепей и позволяет получить временные зависимости характеристик сигналов и режимов электропотребления, которые отражают реальные физические процессы. Методика находит применение в системах контроля и управления целого ряда адаптивных компенсирующих устройств, предложенных в диссертационной работе.

Во второй главе рассматривается понятие энергоэффективности электротехнических комплексов и систем электроснабжения в рамках структурной схемы «источник – посредник – приемник» электроэнергии (рисунок 1), которая характеризует связи процесса передачи и преобразования мощности (электроэнергетические процессы) на произвольных уровнях электроэнергетических систем (ЭЭС).

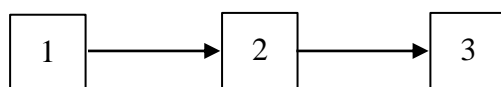


Рисунок 1 – Структурная схема произвольного уровня ЭЭС
1 – источник электроэнергии, 2 – посредник электроэнергии, 3 – приемник электроэнергии

На каждом уровне ЭЭС существует свой источник электроэнергии, свой посредник или комплекс посредников и свой приемник (комплекс приемников) электрической энергии. В качестве источников электроэнергии в зависимости от уровней ЭЭС могут выступать генераторы, питающие сети, распределительные, трансформаторные и преобразовательные подстанции. В качестве посредников обычно выступают связывающие источники и приемники электроэнергии воздушные и кабельные линии электропередачи, токопроводы высокого и низкого напряжений, всевозможные преобразовательные установки трансформаторного и

бестрансформаторного типов, компенсаторы, стабилизаторы, то есть устройства, так или иначе осуществляющие транспорт электроэнергии и согласование электрических параметров источников мощности и потребителей. Потребителями в данном случае являются электротехнические комплексы различной мощности и содержащиеся в них преобразовательные и электротехнологические объекты.

Проведен обзор существующих показателей эффективности электропотребления и показателей качества электроэнергии (электроснабжения), характеризующих энергоэффективность. Сделан вывод о том, что общего критерия количественной оценки энергоэффективности электротехнических комплексов и систем электроснабжения по структурной схеме «источник – посредник – приемник» электроэнергии, удовлетворяющего определению энергоэффективности, на сегодняшний день нет. Проведен анализ и обобщены показатели эффективности электропотребления, качества электроснабжения, а также потерь мощности при передаче энергии от источников к потребителям (приемникам электроэнергии) и синтезирован интегральный (общий) критерий энергоэффективности в виде коэффициента энергоэффективности $\varepsilon_e(t)$ электротехнических комплексов и систем электроснабжения, который определяется выражением:

$$\varepsilon_e(t) = K_{ee}(t) \cdot K_{tp}(t) \cdot K_{eq}(t) \quad [0 \leq \varepsilon_e(t) \leq 1] \quad (16)$$

где $K_{ee}(t)$ – коэффициент эффективности электропотребления, $K_{tp}(t)$ – коэффициент пропускной способности, $K_{eq}(t)$ – коэффициент качества электроснабжения.

При этом коэффициент эффективности электропотребления $K_{ee}(t)$, $[0 \leq K_{ee}(t) \leq 1]$ выражается формулой:

$$K_{ee}(t) = \left(f(t) \cdot \int_{t-\frac{1}{f(t)}}^t [u(t) \cdot i(t)] dt \right) \cdot \left[\left(\sqrt{f(t) \cdot \int_{t-\frac{1}{f(t)}}^t [u(t)]^2 dt} \right) \cdot \left(\sqrt{f(t) \cdot \int_{t-\frac{1}{f(t)}}^t [i(t)]^2 dt} \right) \right]^{-1} \quad (17)$$

где $u(t)$ и $i(t)$ – мгновенные значения напряжения и тока на выходе источника электроэнергии, $f(t)$ – текущая частота напряжения источника электроэнергии.

Коэффициент пропускной способности $K_{tp}(t)$ рассчитывается по формуле:

$$K_{tp}(t) = \frac{P_{out}(t)}{P_{in}(t)} \quad [0 < K_{tp}(t) \leq 1] \quad (18)$$

где $P_{out}(t)$ и $P_{in}(t)$ соответственно активные мощности на выходе и входе посредника электроэнергии.

Коэффициент качества электроснабжения по напряжению $K_{eq}(t)$, $[0 \leq K_{eq}(t) \leq 1]$ определяется по формуле:

$$K_{eq}(t) = K_f(t) \cdot K_l(t) \cdot K_{sin}(t) \cdot K_{sym}(t) \quad (19)$$

где $K_f(t)$ – коэффициент частоты напряжения, $K_l(t)$ – коэффициент уровня напряжения, $K_{sin}(t)$ – коэффициент синусоидальности напряжения, $K_{sym}(t)$ – коэффициент симметрии напряжений (для многофазных систем).

При этом коэффициент частоты напряжения $K_f(t)$ определяется формулой:

$$K_f(t) = e^{-\frac{2 \cdot [f(t) - f_3(t)]^2}{[\Delta f(t)]^2}} \quad [0 < K_f(t) \leq 1] \quad (20)$$

где e – математическая константа (трансцендентное число), $f(t)$ – текущая частота напряжения, $f_3(t)$ – эталонная частота напряжения в момент времени t , $\Delta f(t)$ – величина принятых допустимых отклонений частоты в момент времени t .

Коэффициент уровня напряжения $K_l(t)$ вычисляется по формуле:

$$K_l(t) = e^{-\frac{2 \cdot [U(t) - U_0(t)]^2}{[\Delta U(t)]^2}} \quad [0 < K_l(t) \leq 1] \quad (21)$$

где e – математическая константа (трансцендентное число), $U(t)$ – текущее действующее значение напряжения, $U_0(t)$ – эталонное действующее значение напряжения, $\Delta U(t)$ – величина принятых допустимых отклонений напряжения;

На рисунке 2 изображены графики зависимости коэффициентов частоты $K_f(t)$ и уровня $K_l(t)$ напряжения от текущих значений частот и уровней напряжений в системе.

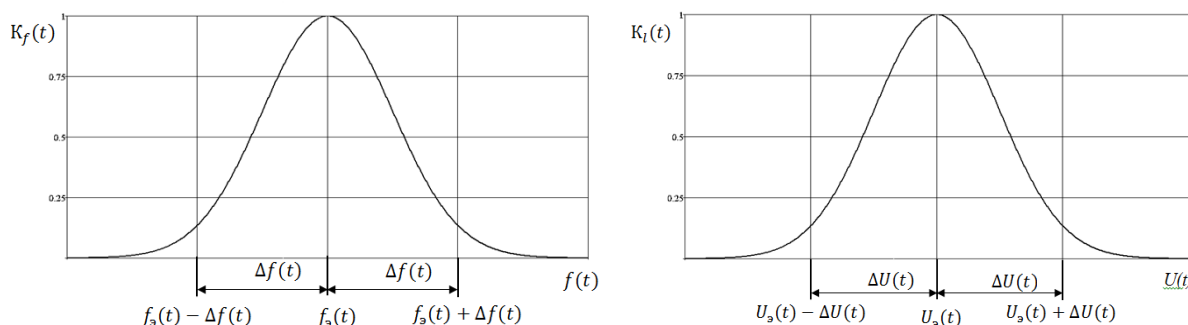


Рисунок 2 – Графики зависимости коэффициентов частоты напряжения $K_f(t)$ и уровня напряжения $K_l(t)$ от текущих значений частот и уровней напряжений в системе.

Коэффициент синусоидальности $K_{sin}(t)$ определяется выражением:

$$K_{sin}(t) = \frac{U_{1д}(t)}{U_{1д}(t) + U_{нд}(t)} \quad [0 \leq K_{sin}(t) \leq 1] \quad (22)$$

где $U_{1д}(t)$ – текущее действующее значение составляющей первого порядка напряжения, $U_{нд}(t)$ – текущее действующее значение составляющих высшего порядка напряжения.

Коэффициент симметрии $K_{sym}(t)$, $[0 \leq K_{sym}(t) \leq 1]$ определяется выражением:

$$K_{sym}(t) = K_{sym_L}(t) \cdot K_{sym_P}(t) \quad (23)$$

где $K_{sym_L}(t)$ – коэффициент амплитудной симметрии напряжений, $K_{sym_P}(t)$ – коэффициент фазовой симметрии напряжений.

При этом коэффициент амплитудной симметрии $[0 \leq K_{sym_L}(t) \leq 1]$, определяется выражением:

$$K_{sym_L}(t) = m^m \cdot \left[\prod_{n=1}^{n=m} U_n(t) \right] \cdot \left[\sum_{n=1}^{n=m} U_n(t) \right]^{-m} \quad (24)$$

где m – целое неотрицательное число (количество фаз m -фазной системы), n – номер линейного или фазного напряжения в многофазной системе, $U_n(t)$ – амплитудные значения составляющих первого порядка n -ого линейного или фазного напряжения.

Коэффициент фазовой симметрии $[0 \leq K_{sym_P}(t) \leq 1]$, определяется по формуле:

$$K_{sym_p}(t) = m^m \cdot \left(\prod_{p=1}^{p=m} |\Delta\varphi_p(t)| \right) \cdot \left(\sum_{p=1}^{p=m} |\Delta\varphi_p(t)| \right)^{-m} \quad (25)$$

где m – целое неотрицательное число (количество фаз m -фазной системы), $\Delta\varphi_p(t)$ – фазовые сдвиги между составляющими первого порядка линейных или фазных напряжений в многофазной системе, p – номер вычисляемого фазового сдвига.

Полученные выражения (19-25) для напряжения справедливы также для оценки качества электроснабжения по току.

На основании полученных выражений для расчета и анализа энергоэффективности по критерию $\varepsilon_e(t)$, предложена методика измерений коэффициента энергоэффективности по мгновенным значениям напряжений и токов. При помощи экспериментального компьютерного моделирования в среде Matlab-Simulink, показана целесообразность применения коэффициента энергоэффективности $\varepsilon_e(t)$ (16) для интегральной многопараметрической оценки энергоэффективности электротехнических комплексов и систем электроснабжения.

В третьей главе рассматриваются вопросы транспортировки электроэнергии от источников электроэнергии к потребителям по линиям электропередачи (ЛЭП). Приведены схемы замещения ЛЭП для различных напряжений и длин линий. Обобщен материал по ключевым вопросам, связанным с режимами работы линий переменного тока. Уделено внимание электрическим и конструктивным особенностям ЛЭП переменного тока, а также известным способам минимизации потерь мощности при помощи оптимизации электрических и конструктивных параметров передачи. На основании рассмотренных особенностей предложена методика снижения потерь и повышения пропускной способности ЛЭП, которая подразумевает разделение линий электропередачи на участки, оптимизацию электрических и конструктивных параметров и компенсацию погонных реактивных сопротивлений каждого участка по принципу элементарной параметрической адаптации. Предложена адаптивная линия электропередачи переменного тока, реализующая данный принцип и обеспечивающая максимальное повышение энергоэффективности и пропускной способности линий, каждый элементарный участок которых может быть представлен в виде схемы замещения (рисунок 3) с сосредоточенными параметрами.

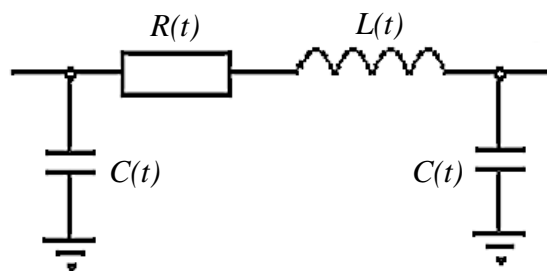


Рисунок 3 – Схема замещения элементарного участка компенсируемой ЛЭП

$R(t)$, $L(t)$, $C(t)$ – активные, индуктивные и емкостные параметры схемы замещения.

При помощи компьютерного моделирования в среде Matlab-Simulink проведены экспериментальные исследования, сравнивающие пропускную способность компенсированной и некомпенсированной ЛЭП при одинаковых параметрах источника и нагрузки, получены энергетические характеристики, подтверждающие теоретические положения о целесообразности применения адаптивных линий электропередачи переменного тока для достижения высоких показателей по энергоэффективности и пропускной способности систем передачи электрической энергии. В третьей главе рассмотрены также вопросы передачи электроэнергии постоянным током. Выделены основные области применения и дана краткая характеристика электропередач постоянного тока с точки зрения пропускной способности и технико-экономической целесообразности применения этих линий в различных условиях.

Четвертая глава посвящена методам и техническим средствам адаптивной компенсации реактивной мощности и стабилизации параметров качества электроэнергии. Проведен обзор современных методов и устройств компенсации реактивной мощности, а также стабилизации параметров качества электроэнергии, выявлены недостатки, препятствующие повышению энергоэффективности электротехнических комплексов и систем по выбранному критерию. Предложены методы и реализующие их устройства компенсации реактивной мощности и стабилизации показателей качества питающих напряжений и токов, которые защищены патентами РФ на изобретения и полезные модели. В работе этих устройств используются два основных принципа:

1. Принцип генерации адаптивных потоков электроэнергии;
2. Принцип адаптивного параметрического регулирования.

Устройства, использующие первый принцип, отличаются высокой скоростью реагирования на разнообразные внешние факторы, возможностью воздействия на отдельные составляющие энергоэффективности, в том числе и на значение частоты в системе. Устройства, использующие второй принцип, имеют более низкую скорость реагирования на разнообразные внешние факторы, обусловленную инерционностью процессов регулирования, и в общем случае могут воздействовать на отдельные составляющие энергоэффективности, кроме частоты. Приведены структурные схемы, описан принцип работы. Проведен теоретический анализ предложенных методов, оценены предельные с точки зрения повышения коэффициента энергоэффективности (16) возможности, реализующих их устройств. Представлены результаты экспериментальных исследований в виде осциллограмм и временных графиков. Показано, что предельные возможности ограничены коэффициентом пропускной способности (18), который зависит от электрических характеристик применяемой элементной базы. Экспериментальные исследования, проведенные при помощи компьютерного моделирования в среде Matlab-Simulink, подтвердили теоретические выводы.

Совместное или комбинированное использование разработанных методов и устройств на различных уровнях электроэнергетических систем (ЭЭС), позволяет повысить энергоэффективность электротехнических комплексов и систем электроснабжения по предложенному критерию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения диссертационной работы были достигнуты следующие основные результаты:

1. Предложена методика анализа и расчета характеристик сигналов и параметров потребления мощности в электрических цепях по мгновенным значениям напряжений и токов, которая с высокой точностью отражает реальные электроэнергетические процессы.
2. Предложен общий критерий показателей эффективности электропотребления и параметров качества электроэнергии, в виде коэффициента энергоэффективности электротехнических комплексов и систем электроснабжения, а также методика его измерения.
3. Предложена методика повышения энергоэффективности и пропускной способности ЛЭП переменного тока на основе принципа элементарной параметрической адаптации.
4. Предложены методы и разработаны оригинальные устройства адаптивной компенсации реактивной мощности и стабилизации параметров качества электроэнергии, обеспечивающие повышение энергоэффективности по выбранному критерию.

Перспективами дальнейшего развития работы являются:

1. Повышение точности и снижение времени измерений характеристик сигналов и параметров потребления мощности в электрических цепях по мгновенным значениям напряжений и токов с учетом реальных системных параметров.
2. Совершенствование аналитических выражений для составляющих предложенного критерия энергоэффективности и разработка аппаратуры для измерений и контроля энергоэффективности электротехнических комплексов и систем электроснабжения на различных уровнях ЭЭС.
3. Разработка систем электропередачи переменного и постоянного тока, обеспечивающих минимизацию потерь при транспортировке электроэнергии.
4. Проектирование и создание электрооборудования с учетом предложенного критерия энергоэффективности.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. *Богачев В. С.* Повышение качества энергии в сетях электропитания потребителей. // Электро. Электротехника. Энергоэнергетика. Электротехническая промышленность.–Москва.: ОАО «Электrozавод», 2011.– №4.– С.47-52.
2. *Богачев В. С.* Компенсация неактивных составляющих полной мощности в электросетях переменного тока. // Главный энергетик.– Москва.: «Совпромиздат», 2011.– №2.

3. *Блинов К. Ю., Богачев В. С., Кошелев П. А., Парамонов С. В.* Индуктивно-емкостный преобразователь для заряда конденсаторной батареи. // Информация и космос. – СПб.: ЗАО «Институт Телекоммуникаций», 2009.– №4.– С.19-23.

4. *Блинов К. Ю., Богачев В. С., Кошелев П. А., Парамонов С. В.* Устройство для заряда емкостных накопителей энергии. // Электро. Электротехника. Электроэнергетика. Электротехническая промышленность – Москва.: ОАО «Электрозавод», 2010.– №3.– С.45-49.

Патенты:

5. *Богачев В. С.* Устройство компенсации искажений тока и реактивной мощности. Патент РФ на изобретение №2393609. Оpubл. 27.06.2010. Бюл.№ 18.

6. *Богачев В. С.* Устройство параметрической стабилизации напряжения переменного тока. Патент РФ на изобретение №2410815. Оpubл. 27.01.2011. Бюл. №3.

7. *Богачев В. С.* Устройство стабилизации напряжения. Патент РФ на изобретение №2392727. Оpubл. 20.06.2010. Бюл. №17.

8. *Богачев В. С.* Устройство стабилизации тока. Патент РФ на изобретение №2427023. Оpubл. 20.08.2011. Бюл. №23.

9. *Богачев В. С.* Стабилизатор напряжения переменного тока. Патент РФ на полезную модель №97836. Оpubл. 20.09.2010. Бюл. №26.

10. *Богачев В. С.* Компенсатор реактивной мощности // Патент РФ на полезную модель №91657. Оpubл. 20.02.2010. Бюл. № 5.

11. *Богачев В. С., Кошелев П. А.* Индуктивно – емкостный преобразователь источника переменного напряжения в источник переменного тока. Патент РФ на полезную модель №101284. Оpubл. 10.01.2011. Бюл. №1.

12. *Богачев В. С., Кошелев П. А., Оpre В. М., Парамонов С. В.* Индуктивно-емкостный преобразователь. Патент РФ на полезную модель №93597. Оpubл. 27.04.2010. Бюл. №12

Другие публикации:

13. *Богачев В. С.* ЭМС электротехнических комплексов и систем. // Труды XII-й международной конференции электромеханика, электротехнологии, электрические материалы и компоненты (МКЭЭЭ).: Крым, Алушта 2008. С. 190.

14. *Богачев В. С.* Обеспечение ЭМС нелинейных приемников электроэнергии систем передачи информации. // Труды 63-й НТК СПбНТОРЭС им. А. С. Попова.: Санкт – Петербург 2008. С. 58-59.

15. *Богачев В. С.* Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии в сетях электропитания аппаратуры связи. // Труды 64-й НТК СПбНТОРЭС им. А. С. Попова.: Санкт-Петербург 2009. С. 58-59.

16. *Богачев В. С., Кошелев П. А., Оpre В.М., Парамонов С. В., Терещенко В. Н.* Активные потери в трансформаторах электротехнологических установок. // Проблемы электроэнергетики. Сборник научных трудов Саратовского государственного технического университета.: Саратов, 2010. С. 52-61.

17. *Кошелев П. А., Богачев В. С.* Анализ искажений и коррекция тока сети методом установки номеров компенсируемых гармоник. // Труды XII международной конференции электромеханика, электротехнологии, электрические материалы и компоненты (МКЭЭЭ).: Крым, Алушта 2008. С. 211.

18. Кошелев П.А., Опре В.М., Богачев В.С., Дозоров С.А., Парамонов С.В. Проектирование генераторов мощных импульсов тока с применением символьных и матричных вычислений. // Проблемы электроэнергетики. Сборник научных трудов Саратовского государственного технического университета.: Саратов, 2009. С. 38-45.
19. Кошелев П. А., Парамонов С. В., Блинов К. Ю., Богачев В. С. Анализ искажений тока сети при работе сварочного выпрямителя. // Проблемы электроэнергетики. Сборник научных трудов Саратовского государственного технического университета.: Саратов, 2008. С. 76-82.
20. Опре В. М., Кошелев П. А., Парамонов С. В., Дозоров С. А., Богачев В.С. Источники тока на основе резонансной трансформаторно-конденсаторной электрической цепи. // Проблемы электроэнергетики. Сборник научных трудов Саратовского государственного технического университета.: Саратов, 2009. С. 25-31.