

На правах рукописи

Асанбаев Юрий Алексеевич

**ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
В ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ**

Специальность 05.09.12 – Силовая электроника

**Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук**

Санкт-Петербург – 2002

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы. Интенсивное внедрение в электроэнергетику преобразовательных устройств большой единичной мощности вызывает появление в электрической системе искажений синусоидальности токов и напряжений. Этот факт в настоящее время закреплён в национальных стандартах на качество электроэнергии и в других документах. Расширение области фактического существования в электрической системе режимов с искажёнными токами и напряжениями всё более настоятельно требует создания энергетической теории этих режимов. Необходимость создания такой теории диктуется как проблемами, возникающими при сведении балансов энергии и мощности в энергосистеме, так и при рассмотрении энергетических процессов в самих преобразовательных системах и устройствах, а также при рассмотрении процессов обмена энергией между ними и энергосистемой. Проблема искажений, рассматриваемая с позиций теории энергетических процессов, весьма тесно связана с проблемой повышения эффективности работы всей электрической системы.

Существующее положение в этой области теории электрических систем достаточно противоречиво. С одной стороны, разработаны и широко распространены методы расчёта напряжений и токов при наличии искажений. С другой стороны, единых методов энергетических расчётов, т. е. расчётов энергии и мощности по заданным несинусоидальным токам и напряжениям, не создано до сих пор. Состояние теории красноречиво характеризует тот факт, что в стандартах МЭК для несинусоидальных токов и напряжений дано определение только средней составляющей активной мощности и кажущейся мощности. Поэтому общепринятых методов оценки энергетической эффективности при наличии искажений в токе и напряжении, нет. Более того, при наличии искажений существуют разногласия даже в оценке правильности алгоритмов измерения активной мощности. На этом фоне не удивительно появление теорий «об обратном потоке энергии» от нагрузки в сеть, неясности в определении КПД преобразователей и трансформаторов и даже появление предложений о перекачке энергии «из вакуума» с помощью электрической дуги.

Отставание теории особенно недопустимо при переходе энергетики к рыночным отношениям, которые диктуют необходимость всемерного сокращения издержек производства, в частности, потерь энергии и мощности, а также повышения точности учёта на всех стадиях производства, передачи, распределения и потребления электрической энергии.

Отсутствие научно обоснованного подхода к решению указанных энергетических проблем неоднократно подтверждено выступлениями у нас и за рубежом. Об этом свидетельствуют материалы специального заседания Научного Совета АН СССР, рассматривавшего в 1984 г. методические аспекты понятий «активная и реактивная мощность», материалы Европейского Международного семинара по определению и измерению мощности в несинусоидальных процессах, материалы дискуссии, организованной в 1996 г. рабочей группой американского института инженеров-электриков IEEE по той же проблематике. На этой дискуссии рассмат-

ривалось предложение об использовании «практических» определений составляющих мощности переменного тока при наличии искажений.

В работе проанализированы многочисленные попытки обобщить понятие реактивной мощности на несинусоидальные процессы (Будеану, Фризе, Круг) или ввести другие общие понятия, заменяющие ее (Маевский, Кадомский, Демирчян, Жарков, Emanuel и др.). Показаны причины, по которым эти усилия не привели к созданию общепринятой теории, учитывающей искажения и в токе, и в напряжении. Отмечено, что в силу этого не находят решения и актуальные проблемы анализа и измерений энергии и мощности.

Цели и задачи исследования. При выполнении настоящей работы была поставлена цель разработать методы анализа периодических энергетических процессов в электрических системах при наличии любых искажений в токе и напряжении, при любой конфигурации сети и любых источниках энергии, считая известными все мгновенные токи, напряжения и параметры сети. Эти методы должны в совокупности образовать общую теорию периодических энергетических процессов в преобразователях, т.е. теорию, описывающую наиболее общие закономерности энергетических процессов в электрических системах. Общая энергетическая теория помимо системы основных понятий должна содержать алгоритмы решения практических задач. В их число входят:

- определение составляющих энергии и мощности;
- физическое истолкование содержательной сущности каждой составляющей, математическое описание её признаков и свойств.
- определение причин возникновения каждой составляющей в цепи, её источников и приемников;
- определение возможности взаимодействия между составляющими;
- разработка методик расчёта распространения составляющих в цепи, алгоритмов составления уравнений связи между составляющими энергии и мощности (балансов) для каждой составляющей в любом контуре, ветви и узле цепи;
- разработка методик расчета энергетических показателей преобразовательных установок;
- научное обоснование методик и алгоритмов измерения каждой составляющей энергии и мощности, пригодные для практического применения;
- разработка методов исследования влияния параметров цепи на особенности энергетического процесса.

Общая теория должна явиться основой для разработки специальных разделов теории, направленных на решение частных общетеоретических и практических задач (к ним можно отнести выявление особенностей энергетических процессов в многофазных системах, исследование компенсации составляющих мощности, связь их с потерями и КПД и т.д.).

Одним из практических применений общей теории должно быть научное обоснование разработок системы измерений энергии и мощности. Это применение необходимо в первую очередь для автоматизированных систем управления технологическими процессами электрических станций и подстанций, обеспечивающих информационную поддержку задач диспетчерского и автоматического управления

как режимом станции и подстанции, так и режимом территориально распределённых электрических сетей высших уровней иерархии (ПЭС, РЭС, ОДУ и ЦДУ).

Для достижения поставленных целей в диссертационной работе были решены следующие задачи:

- а) определена содержательная сущность составляющих энергии и мощности переменного тока;
- б) выявлены условия и причины возникновения каждой составляющей мощности в цепи;
- в) созданы методики анализа взаимного влияния (компенсации) составляющих мощности;
- г) определена роль в энергетическом процессе каждой составляющей мгновенной и кажущейся мощности; и установлены связи между ними;
- д) разработаны алгоритмы расчёта и анализа влияния параметров цепи на источники энергии;
- е) предложена методика эквивалентирования и замещения элементов цепи электрическими сопротивлениями; определяемыми через составляющие мощности;
- ж) разработаны алгоритмы измерения отдельных составляющих мощности и энергетических характеристик преобразовательных установок;
- з) проиллюстрированы свойства электроэнергетических процессов на механических системах.

Методологическая основа исследований. Методологической основой диссертационной работы явились теоретические положения и принципы системного подхода, сформулированные в работах В.Ф. Миткевича (физические основы электротехники, 1932 г.), Л.Р. Неймана (теоретические основы электротехники, 1975 г.), К.С. Демирчяна (ортомощность, 1992 г.), К.А. Круга (реактивная мощность, 1936 г.) и развитые ведущими специалистами А.В. Поссе (мощность преобразовательного трансформатора, 2001 г.), В.А. Лабунцовым (пассивная мощность, 1993 г.), Г.С. Зиновьевым (реактивная мощность, 1992 г.), О.А. Маевским (приведенная реактивная мощность, 1978 г.), Н.П. Матхановым (нелинейные цепи, 1986 г.), Ф.П. Жарковым (обменная мощность, 1984 г.), Н.Н. Щедриным (эквивалентирование преобразователей, 1966 г.), А.В. Нетушилом (мощность дуги, 1993 г.), Д.Е. Кадомским (интегральная приведенная реактивная мощность, 1987 г.), Ю.С. Крайчиком (соотношения в преобразователе, 2000 г.), В.И. Емельяновым (теория преобразователей, 1961 г.) Ю.Г. Толстым (цепи с вентильными элементами, 1978 г.), В.И. Кочкиным (компенсация реактивной мощности, 2000 г.), Е.И. Берковичем (негэнтропия, 1989), А.Ф. Крогерисом, К.К. Рашевицем, Э.П. Трейманисом, Я.К. Шинка (мощность переменного тока, 1993 г.), И.В. Жежеленко (влияние гармоник, 1987 г.), Г. Супроновичем (коэффициент мощности преобразователей, 1983 г.) и другими учёными. Важный вклад сделали Vudeanu С I (разложения в частотной области, 1927 г.), Fryze S. (разложения во временной области, 1931 г.), Emanuel A. (“практическое” определение составляющих мощности, 1999 г.), Depenbrock M (метод ДБФ, 1994 г.), Nowomiejski. (всеобщая теория мощности, 1981 г.), Page С.Н. (мощность непериодических процессов, 1980 г.), Czarneski L.S. (принципы измерения реактивных токов, 1985 г.), Filipski P.S. (измерения реактивной мощности, 1993 г.), Pen-

feld, П., Spens R., Duinker S., (энергетическая теория цепей, 1974 г.), Tröger R (внешняя, реверсная, входная, взаимная мощности, 1953 г.) и др.

Основопологающим принципом диссертационной работы, было «умение понимать физическую сторону происходящих процессов и на этой основе оценивать достоверность полученных числовых данных. Последнее возможно лишь после осмысливания и понимания физики электромагнитных явлений в электрических цепях.» Этот принцип, сформулированный академиком К.С. Демирчяном в предисловии к третьему изданию учебника ТОЭ (1981 г.), выражает главную традицию отечественной школы теоретической электротехники и особенно её Петербургской школы.

Научная новизна работы. В диссертационной работе приводится новая классификация составляющих энергии и мощности в цепях с несинусоидальными периодическими токами. Введено обобщенное (родовое) понятие пассивной мощности, включающее частные (видовые) понятия реактивной, искажающей и ключевой составляющих мощности. Введение понятия ключевой мощности и уточнение понятий других составляющих имеет принципиальное значение для исследований энергетических процессов в преобразовательных установках. Установлены взаимные связи (балансы) составляющих мощности цепи.

Практическая значимость работы. Практическая значимость работы заключается в решении важной народнохозяйственной проблемы – научное обоснование методов и средств расчёта и измерений энергии и мощности в энергосистемах, содержащих мощные преобразовательные установки.

Конкретные результаты работы. Конкретными результатами работы является решение ряда практических задач из областей силовой электроники и преобразовательной техники, теории нелинейных цепей и техники измерения энергии и мощности при наличии искажений напряжения и тока. Практическое применение разработанных методов иллюстрируется анализом энергетических режимов преобразовательных схем, содержащих нелинейные, вентильные и ключевые элементы, анализом схем компенсации составляющих мощности, алгоритмами измерения в АСУ ТП мощности и учёта электроэнергии при наличии искажений.

Апробация работы и публикации. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 8-м Международном симпозиуме по МГД-преобразованию энергии (1983 г.), на конференции «Преобразовательная техника в энергетике (ПТЭН-84)», на секции Санкт-Петербургского отделения Международной энергетической академии (2001 г.), на заседаниях Научно-технического совета НИИПТ в 1996 и 2001 г.г., на конференциях в РАО «ЕЭС России» и др. По теме диссертации опубликованы монография автора «Периодические энергетические процессы в электрических системах» (1997 г., 420с.) и 20 печатных работ. В 1999 – 2000 г.г. автором читались лекции слушателям института повышения квалификации ГВЦ РАО «ЕЭС России» об измерении энергии и мощности при несинусоидальных процессах. Монография автора передана в ГУП «ВЭИ», ОАО «ВНИИЭ», СПбГТУ, СПбГЭТУ и другие организации для практического использования теории в работе.

Результаты диссертационной работы использованы в ОАО «НИИПТ» при внедрении АСУ ТП на Выборгской преобразовательной подстанции электропере-

дачи Россия – Финляндия и в научно-исследовательских работах института по АСУ ТП подстанций.

В рамках данного направления работ сотрудницей отдела АСУ ТП Т.Г. Горелик под руководством автора выполнена и представлена к защите в 2001 г. кандидатская диссертация.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 184 наименования, двух приложений. Общий объем – 280 страниц. Основная часть изложена на 243 страницах, содержит 28 рисунков и три таблицы. Приложения изложены на 36 страницах.

Основное содержание работы

Во введении кратко освещается состояние проблемы, формулируется цель и задачи исследования, приводятся основные положения диссертации, выносимые на защиту.

В главе 1 приводится общая теория периодических энергетических процессов в преобразовательных установках: сформулированы исходные положения, необходимые новые термины и определения, основные положения общей теории периодических энергетических процессов в преобразовательных установках.

В п.1.1 введена специальная форма записи мгновенных значений несинусоидальных напряжения и тока, существенно упрощающих исследования периодических процессов:

$$u(t) = u = U_m \varphi_u(t); \quad i(t) = i = I_m \varphi_i(t),$$

где $\varphi_u(t) \equiv \varphi_u$, $\varphi_i(t) \equiv \varphi_i$ - безразмерные функции, нормированные к единице,

$$1 \leq \varphi_u \leq 1; \quad -1 \leq \varphi_i \leq 1.$$

U_m , I_m - максимальные значения u и i на периоде.

Изложены основные свойства периодических функций, используемые при ортогональных разложениях.

В п.1.2 показано, что мгновенные токи, напряжения, мощности и их составляющие в преобразовательных установках можно записать в компактном виде в форме специальной матрицы интервалов, элементами которой являются кусочно-непрерывные функции, заданные на всех интервалах непрерывности. Так, напряжение на вентиле выпрямителя со средней точкой с помощью матрицы интервалов можно записать в виде $u_{\text{в}} = [U_m \sin \eta, 2 U_m \sin \eta, U_m \sin \eta, 0] = U_m \sin \eta [1, 2, 1, 0]$. Сформулированы основные свойства и правила операций с такими матрицами, используемыми при ортогональных разложениях.

В п.1.3 рассмотрены свойства мгновенной мощности для элементов электрической цепи, наиболее часто встречающихся в энергетике, преобразовательной технике и силовой электронике. К числу этих элементов относятся источники энергии, индуктивность, емкость, резистор, и ключевой элемент. Анализ свойств полной мощности пассивных элементов показывает, что эти свойства являются инвариантными относительно форм приложенных напряжения и тока, состава и топологии цепи и других факторов. Вследствие этого составляющие мощности пассивных элементов цепи могут быть определены априори и вычисляются весьма просто, если мгновенные токи и напряжения схемы известны. Для активных элементов, напротив, составляющие полной мощности не могут быть определены априори.

ри. При таком подходе задача энергетического расчёта цепи по существу сведена к определению составляющих мощности и энергии в активных элементах цепи и анализу баланса этих составляющих в узлах, ветвях и контурах цепи.

В п.1.4. даны общая постановка задачи и основные энергетические понятия и определения.

Теория энергетических процессов в преобразовательных установках должна рассматриваться как составная часть теории электрических цепей. Поэтому для неё должны быть справедливы все допущения, идеализация и модели, принятые в теории электрических цепей. Эти допущения должны быть дополнены положениями, учитывающими особенности энергетических процессов и составляющими концептуальную базу энергетической теории. В качестве исходных допущений приняты следующие положения.

Положение 1. Процессы периодического изменения напряжения и тока в электрической цепи сопровождаются изменениями мощности и энергии. Существует три основных типа периодических энергетических процессов:

1.1. Процессы, в которых результирующее изменение энергии в цепи за период не равно нулю;

1.2. Процессы, в которых результирующее изменение энергии за период равно нулю;

1.3. Процессы, в которых мощность и энергия в любой момент времени равны нулю.

Положение 2. В зависимости от набора элементов и структуры цепи в ней могут протекать одновременно энергетические процессы разного типа. При этом энергетический процесс в каждый момент времени может быть представлен в виде суммы составляющих процессов так, чтобы каждой составляющей можно было бы сопоставить элементы цепи, являющиеся причиной возникновения данной составляющей, и участки цепи, в которых существуют отдельные составляющие энергетического процесса в чистом виде.

Положение 3. Любые периодические энергетические процессы в любой цепи могут быть описаны с помощью понятий электродвижущей силы, напряжения, тока и параметров цепи: индуктивности, емкости, активного сопротивления и ключевых элементов.

Положение 4. Теория энергетических процессов в нелинейных и параметрических цепях при применении её к линейным цепям с постоянными и синусоидальными токами и напряжениями должна давать результаты, полностью совпадающие с результатами общепринятой теории синусоидальных энергетических процессов.

В основе определения количественных соотношений для энергии и мощности лежат три фундаментальных энергетических соотношения (закона). Первый энергетический закон (закон сохранения энергии в дифференциальной форме) гласит: *скорость поступления энергии в цепь от источников (суммарная мгновенная мощность источников энергии) в любой момент времени равна скорости преобразования энергии во всех пассивных элементах цепи (суммарной мгновенной мощности всех пассивных элементов цепи)*

$$\sum_N s_k = 0; \quad \sum_{N_e} s_{ek} = \sum_{N_s} s_{\varepsilon k} \quad (1)$$

где N_s общее число источников энергии (активных элементов); N_e число пассивных (не содержащих источников) элементов; $N = N_e + N_s$ – общее число элементов цепи; $s_{ek} = u_{ek}i_{ek}$ – мгновенная мощность k -го пассивного элемента цепи; $s_{\varepsilon k} = u_{\varepsilon k}i_{\varepsilon k}$ – мгновенная мощность k -го источника энергии. Первый энергетический закон устанавливает связи между всеми элементами цепи: линейными, нелинейными, параметрическими т.д. Он сохраняет силу при любых формах напряжения и тока, в периодических и непериодических процессах.

В соответствии с (1) мгновенная мощность источника энергии может быть представлена в виде суммы мгновенных мощностей элементов цепи, на которые нагружен данный источник. Поэтому мгновенные мощности пассивных элементов цепи могут быть приняты в качестве составляющих полной мощности участков цепи и источников энергии.

Для обеспечения однозначности составляющие мощности источников энергии, получающиеся при разложении, должны балансироваться с известными значениями мгновенной мощности пассивных элементов. Это условие позволяет учитывать топологические особенности и элементный состав цепи. Для его проверки необходим анализ баланса составляющих в узлах, ветвях и контурах. Изложенный подход открывает возможность построения энергетической теории с учетом физического содержания процессов в цепи, а не только на базе формально-математических построений.

Поскольку составляющие мгновенной мощности имеют одинаковую физическую природу и характеризуют скорость реально существующих преобразований электромагнитной энергии, они складываются алгебраически. Иная ситуация возникает при рассмотрении изменения энергии или работы, совершаемой в цепи за некоторый интервал времени.

В периодических процессах средняя мощность P определяется как усредненное изменение энергии в источнике и цепи W за период. Интегрирование (1) за период дает уравнения второго энергетического закона – закона сохранения энергии для периодических процессов в интегральной форме

$$W = \int_0^T p dt = \int_0^T ui dt. \quad P = W/T = T^{-1} \int_0^T p dt; \quad (2)$$

$$\sum_{N_s} W_{\varepsilon k} = \sum_{N_R} W_{Rk}; \quad \sum_{N_s} P_{\varepsilon k} = \sum_{N_R} P_{Rk}, \quad (3)$$

где N_R – число резисторов; $W_{\varepsilon k}$, W_{Rk} – изменение энергии за период в k -м источнике и в k -м резисторе; $P_k = W_k/T$ – средняя за период мощность k -го элемента цепи.

Второй закон устанавливает связи между изменением средней за период энергии в источниках и потреблением ее в резисторах. Все другие элементы цепи работы не производят. Однако их присутствие воздействует на количество произведенной работы и изменение энергии цепи. Вместе с тем в (3) все элементы цепи, в которых изменение энергии за период равно нулю, в явном виде не присутству-

ют. Поэтому влияние этих элементов на энергетический процесс здесь не просматривается и невозможно установить и проанализировать факторы, влияющие на изменение энергии, кроме источников и резисторов. Вследствие этого соотношения (1)–(3) недостаточны для полной характеристики энергетического процесса и должны быть дополнены уравнениями, учитывающими влияние, оказываемое на изменение энергии всеми элементами цепи.

При любой форме напряжения и тока на постоянном резисторе $u / i = \text{const}$, поэтому энергия $W_{pз}$ и средняя мощность $P_{pз}$ резистора выражаются через действующие напряжение и ток:

$$\int_0^T ui \, dt. = UI T; \quad P_{pз} = W_{pз}/T = UI.$$

Для других элементов при $u/i \neq \text{const}$ в соответствии с неравенством Буняковского имеем:

$$\int_0^T ui \, dt. \leq \sqrt{\int_0^T u^2 \, dt} \sqrt{\int_0^T i^2 \, dt}; \quad \text{т.е. } P \leq S. \quad (4)$$

Из (4) следует, что при $u/i \neq \text{const}$ фактическое изменение энергии за период всегда меньше величины S . Существуют два условия, которые приводят к нарушению равенства $S = P$. Первое – наличие интервалов времени, на которых знак мощности изменяется. Это условие обусловлено процессами, происходящими в накопителях. Второе условие связано с наличием интервалов времени, на которых либо только ток, либо только напряжение тождественно обращаются в нуль. В диссертации показано, что это условие имеет место при наличии в цепи ключевого элемента. Таким образом, неравенство (4) характеризует влияние элементов, не совершающих работы, на энергетический процесс во всей цепи. Это влияние проявляется в уменьшении активной мощности P относительно потенциально возможной расчетной мощности S при заданных U и I .

В соответствии с изложенными положениями для установления количественных характеристик энергетического процесса необходимо, зная режим и параметры цепи и используя уравнения Кирхгофа, дать математическое описание составляющих мгновенных и действующих мощностей и составить уравнения их баланса.

Составляющие мгновенной мощности. Взаимное положение мгновенного тока и напряжения по оси времени характеризуется понятиями изоформности и ортогональности.

Определение 1. *Напряжение и ток являются изоформными (коллинеарными), то-есть имеющими одинаковую форму, если отношение их мгновенных значений на всем периоде сохраняется постоянным*

$$u(t) / i(t) = \text{const}, \quad t \in [T]. \quad (1.1)$$

Определение 2. *Мгновенная активная мощность двухполюсника $p(t)$ есть скорость поступления в двухполюсник электромагнитной энергии в данный момент времени, равная произведению мгновенных тока и напряжения на входе двухполюсника, если ток и напряжение изоформны:*

$$p(t) = U_m I_m \varphi^2(t). \quad (1.2)$$

Определение 3. Напряжение и ток являются ортогональными, если для их мгновенных значений выполняется условие:

$$\int_0^T ui \, dt = U_m I_m \int_0^T \varphi_u \varphi_i \, dt = 0, \quad (1.3)$$

(при этом тривиальный случай, когда $\varphi_u \equiv 0$ или $\varphi_i \equiv 0$, исключается).

Определение 4. Мгновенная пассивная мощность двухполюсника $q(t)$ есть скорость поступления электромагнитной энергии в двухполюсник в данный момент времени, равная произведению мгновенных тока и напряжения на входе двухполюсника, если ток и напряжение ортогональны:

$$q = ui = U_m I_m \varphi_u \varphi_i, \quad \text{при} \quad \int_0^T ui \, dt = \int_0^T \varphi_u \varphi_i \, dt = 0. \quad (1.4)$$

В общем случае на входе двухполюсника одновременно существуют и активная, и пассивная составляющие, образуя в сумме полную мгновенную мощность. Как было показано Фризе в 1931 г., эти составляющие могут быть определены путем разложения полной мощности на две ортогональные составляющие во временной области. Из всех возможных способов наиболее рационально использовать два. В первом напряжение на входе двухполюсника u разлагается на две составляющие: активную u_a (она должна быть изоформна току) и пассивную u_π (она должна быть ортогональна току): $u = u_a + u_\pi$. Если двухполюсник представляет собой последовательное соединение двух разнородных элементов (например, резистивного и реактивного), ортогональные составляющие u_a и u_π совпадают с реальными напряжениями на этих элементах. Во втором способе разлагается ток i на активную составляющую i_a (она должна быть изоформна напряжению) и пассивную i_π (она должна быть ортогональна напряжению): $i = i_a + i_\pi$. Если двухполюсник представляет собой параллельное соединение двух элементов, (например, резистивного и реактивного), ортогональные составляющие i_a и i_π совпадают с реальными токами в этих элементах. Оба разложения имеют вид:

$$\begin{aligned} u &= U_m \varphi_u = u_a + u_\pi = U_{ma} \varphi_i + U_{m\pi} \varphi_{i\pi}, \\ i &= I_m \varphi_i = i_a + i_\pi = I_{ma} \varphi_u + I_{m\pi} \varphi_{i\pi}, \end{aligned} \quad (1.5)$$

где

$$\begin{aligned} \int_0^T u_\pi i \, dt &= \int_0^T i_\pi u \, dt = 0; \\ \varphi_{u\pi} &= U_{m\pi}^{-1} (u - u_a); & \varphi_{i\pi} &= I_{m\pi}^{-1} (i - i_a); \\ U_{mn} &= \text{Max}(u - u_a); & I_{mn} &= \text{Max}(i - i_a). \end{aligned} \quad (1.6)$$

Умножив первое уравнение (1.5) на φ_i , а второе на φ_u и проинтегрировав на периоде, получим:

$$\begin{aligned} U_{ma} &= \frac{U_m}{d_i} \int_0^T \varphi_u \varphi_i \, dt; & I_{ma} &= \frac{I_m}{d_u} \int_0^T \varphi_u \varphi_i \, dt, \\ d_i &= \left(\frac{1}{T} \int_0^T \varphi_i^2 \, dt \right)^{0,5}; & d_u &= \left(\frac{1}{T} \int_0^T \varphi_u^2 \, dt \right)^{0,5}; & d_a^2 &= \frac{1}{T} \int_0^T \varphi_u \varphi_i \, dt. \end{aligned}$$

Активная и пассивная составляющие мощности s :

$$s = U_m I_m \varphi_u \varphi_i = I_m U_{ma} \varphi_{ua} \varphi_i + I_m U_{m\pi} \varphi_{u\pi} \varphi_i = U_m I_{ma} \varphi_u \varphi_{ia} +$$

$$+ U_m I_{m\pi} \varphi_u \varphi_{i\pi} = p_u + q_u = p_i + q_i; \quad (1.7)$$

где $p_u = u_a i = I_m U_{ma} \varphi_i^2$ и $p_i = u i_a = U_m I_{ma} \varphi_u^2$ - мгновенные активные составляющие мощности при разложении напряжения (p_u) и тока (p_i);

$q_u = u_\pi i = U_{m\pi} I_m \varphi_u \varphi_i$ и $q_i = U_m I_{m\pi} \varphi_u \varphi_{i\pi}$ - мгновенные пассивные составляющие мощности при разложении напряжения (q_u) и тока (q_i). Используя коэффициент смещения d_a , имеем:

$$p_u = U_m I_m (d_a^2 / d_i^2) \varphi_i^2; \quad p_i = U_m I_m (d_a^2 / d_u^2) \varphi_u^2.$$

Отсюда активная и пассивная составляющие

$$s = U_m I_m \varphi_u \varphi_i = U_m I_m d_a^2 / d_i^2 \varphi_i^2 + U_{m\pi} I_m \varphi_u \varphi_i = \\ = U_m I_m d_a^2 / d_u^2 \varphi_u^2 + U_m I_{m\pi} \varphi_u \varphi_{i\pi}.$$

Составляющие кажущейся мощности. Для кажущейся мощности введены понятия, аналогичные понятиям, введенным для мгновенной мощности.

Определение 5. *Кажущаяся мощность двухполюсника S есть величина, равная произведению действующих напряжения и тока на входе двухполюсника:*

$$S = UI = d_u d_i U_m I_m = d_s S_m \quad (1.8)$$

Это выражение является определением полной (кажущейся) мощности двухполюсника, принятое в ГОСТ 19880-74 (определение 224) и в стандарте МЭК (определение 05-41-155). Область применения этих определений не ограничена синусоидальными токами и напряжениями.

Определение 6. *Активная мощность двухполюсника P есть величина, равная произведению действующих напряжения и тока на входе двухполюсника, если мгновенные напряжение и ток изохормны:*

$$P = UI = T^{-1} \int_0^T p(t) dt. \quad (1.9)$$

Активная мощность равна среднему за период значению мгновенной активной мощности.

Определение 7. *Пассивная мощность двухполюсника Q есть величина, равная произведению действующих напряжения и тока на входе двухполюсника, если мгновенные напряжение и ток ортогональны:*

$$Q = \frac{1}{T} U_m I_m \left[\int_0^T \varphi_u^2 dt \right]^{0,5} \left[\int_0^T \varphi_i^2 dt \right]^{0,5} = d_u d_i S_m \quad (1.10)$$

где φ_u , φ_i удовлетворяют условиям ортогональности (1.4). Из (1.5), (1.6):

$$U_a = \left[\frac{1}{T} \int_0^T u_a^2 dt \right]^{0,5} = \frac{d^2}{d_i} U_m; \quad I_a = \left[\frac{1}{T} \int_0^T i_a^2 dt \right]^{0,5} = \frac{d^2}{d_u} I_m. \quad (1.11)$$

В силу ортогональности U_a , U_π и I_a , I_π

$$U^2 = U_a^2 + U_\pi^2; \quad I^2 = I_a^2 + I_\pi^2. \quad (1.12)$$

Поэтому $S^2 = U^2 I^2 = U^2 I_a^2 + U^2 I_\pi^2 = U_a^2 I^2 + U_\pi^2 I^2 = P_u^2 + Q_u^2 = P_i^2 + Q_i^2 = P^2 + Q^2$, т.е. величина активной P и пассивной Q составляющих кажущейся мощности не зависит от способа разложения: по току, или по напряжению.

Для численной характеристики соотношений между активной, пассивной и кажущейся мощностью используются коэффициенты активной λ_a и пассивной λ_n мощности:

$$\lambda_a = P/S = U_a/U = I_a/I; \quad \lambda_\pi = Q/S = U_\pi/U = I_\pi/I; \quad \lambda_a^2 + \lambda_\pi^2 = 1.$$

Для установления физического содержания полученных энергетических соотношений рассмотрены процессы в двух линейных двухполюсниках с синусоидальными токами и напряжениями. Показано, что для предложенных определений составляющие мгновенной и действующей мощности полностью совпадают с результатами, получаемыми классической теорией.

При анализе физического содержания соотношений (1.5) – (1.7) необходимо иметь в виду, что, строго говоря, мгновенная мощность, понимаемая как скорость поступления энергии в некоторый момент времени, сама по себе не может быть ни активной, ни пассивной (реактивной, искажающей и т.д.), ни какой-либо другой, ибо понятия «активная», «пассивная» характеризуют свойство мощности не в данный момент времени, а на интервале наблюдения - периоде. Поэтому физическое содержание мгновенной активной мощности отличается от содержания мгновенной пассивной (реактивной, искажающей и т.д.) мощности не более, чем физическое содержание постоянной составляющей напряжения отличается от физического содержания переменной составляющей того же мгновенного напряжения.

Между мгновенной мощностью s и действующей мощностью S есть принципиальная разница. Мгновенная мощность s , как реально существующая физическая величина, может быть представлена в виде суммы других реально существующих величин: мгновенных активной и реактивной составляющих. По отношению к этим величинам мгновенную мощность s можно называть полной. По отношению к действующей мощности S , как к некоторой расчётной величине, более уместен принятый в английском, немецком и французском языках термин «кажущаяся мощность», который ранее применялся и в русском языке [89].

В п.1.5. подробно рассмотрены составляющие пассивной мощности. Показано, что к уравнению ортогональности (1.3) можно указать три различных дополнительных соотношения, определяющих каждый свой вид пассивной мощности.

Определение 8. *Мгновенная реактивная мощность $q_r(t)$ есть скорость поступления электромагнитной энергии в двухполюсник в данный момент времени, равная произведению мгновенных тока $i(t)$ и напряжения $u(t)$ на входе двухполюсника*

$$q_r(t) = ui = U_m I_m \varphi_u \varphi_i,$$

если u и i удовлетворяют условиям:

$$\varphi_u = L \, d\varphi_i/dt, \quad \varphi_u = \frac{1}{C} \int_0^t \varphi_i \, dt, \quad (1.13)$$

$$\varphi_i = C \, d\varphi_u/dt, \quad \varphi_i = \frac{1}{L} \int_0^t \varphi_u \, dt. \quad (1.14)$$

При выполнении этих условий выражения для реактивной мощности $q_r(t)$ можно записать и в таком виде:

$$q_r(t) = LI_m^2 \, \varphi_i \, d\varphi_i/dt = \frac{1}{L} U_m^2 \, \varphi_u \int_0^t \varphi_u \, dt$$

$$q_r(t) = CU_m^2 \varphi_u d\varphi_u/dt = \frac{1}{C} I_m^2 \varphi_i \int_0^t \varphi_i dt.$$

В двухполюсниках, содержащих только идеальные накопители, при любых напряжениях и токах протекает только реактивная мощность.

Определение 9. *Реактивная мощность двухполюсника Q_r есть величина, равная произведению действующих значений тока I и напряжения U на входе двухполюсника, если мгновенные значения тока $i(t)$ и напряжения $u(t)$ на входе удовлетворяют условиям существования мгновенной реактивной мощности*

$$Q_r = \frac{1}{T} U_m I_m \left(\int_0^T \varphi_u^2 dt \int_0^T \varphi_i^2 dt \right)^{0,5},$$

где φ_u и φ_i удовлетворяют условиям (1.13), (1.14).

Реактивная мощность Q_r при несинусоидальных токах и напряжениях имеет размерность активной мощности и проявляется только как фактор, влияющий на величину активной мощности. Это означает, что в отличие от q_r реактивная мощность Q_r входит в систему основных понятий как расчетная величина.

Сдвиг тока относительно напряжения может возникать, если в цепи действуют несколько источников энергии, ЭДС которых имеют одинаковые частоты, но разную форму. В этом случае в источниках энергии возникает реактивная мощность, которую можно назвать уравнивающей (или компенсирующей). Уравнивающая мощность отличается только механизмом возникновения.

Определение 10. *Мгновенная мощность искажения (или мгновенная искажающая мощность) q_d есть скорость поступления в двухполюсник электромагнитной энергии в данный момент времени, равная произведению мгновенных тока $i(t)$ и напряжения $u(t)$ на входе двухполюсника, если спектральные составы тока и напряжения полностью не совпадают :*

$$q_d = U_m I_m \varphi_u \varphi_i,$$

где φ_u , φ_i удовлетворяют условиям

$$\varphi_u = \sum \varphi_{kj}; \quad \varphi_i = \sum \varphi_{mj}; \quad k_j \in \mathbf{B}; \quad m_j \in \mathbf{D}; \quad \mathbf{BUD} = \emptyset, \quad (1.15)$$

Мгновенная мощность искажения может быть связана с наличием в двухполюснике источника тока, спектральный состав которого отличается от спектрального состава источника напряжения. Эта мощность может быть обусловлена также и наличием в цепи нелинейных и параметрических элементов. В этом случае никаких реальных обменных потоков в цепи не существует.

Определение 11. *Мощность искажения (искажающая мощность) Q_d есть величина, равная произведению действующих значений тока I и напряжения U на входе двухполюсника, если мгновенные значения $u(t)$ и $i(t)$ на входе двухполюсника удовлетворяют условиям существования мгновенной мощности искажений:*

$$Q_d = \frac{1}{T} U_m I_m \left(\int_0^T \varphi_u^2 dt \int_0^T \varphi_i^2 dt \right)^{0,5},$$

где φ_u и φ_i удовлетворяют условиям (1.15).

Третий случай условий ортогональности характеризуется тем, что ни одна из функций φ_u , φ_i не обращается тождественно в ноль на всём интервале T , но произведение их в любой момент времени равно нулю:

$$\varphi_u(t) \varphi_i(t) \equiv 0, \quad t \in [T], \quad \text{но } \varphi_u(t) \not\equiv 0, \quad \varphi_i(t) \not\equiv 0. \quad (1.16)$$

Если φ_u и φ_i удовлетворяют условиям (1.16), то формально удовлетворяется и условие ортогональности (1.3), вследствие чего мощность, определяемая произведением таких функций, должна относиться к классу пассивной мощности.

Определение 12. *Мгновенная ключевая мощность $q_{kl}(t)$ есть величина, равная произведению мгновенных тока $i(t)$ и напряжения $u(t)$ на входе двухполюсника, удовлетворяющих условиям (1.16), и равна нулю тождественно на всем интервале времени T :*

$$q_{kl}(t) = U_m I_m \varphi_u \varphi_i \equiv 0, \quad t \in [T].$$

Энергетический баланс цепи за период зависит от ключевого элемента так же, как и от других элементов цепи. Эта зависимость проявляется в том, что в чисто резистивной цепи при наличии ключевого элемента нарушается изоформность тока и напряжения в источнике энергии так же, как при наличии накопителей. Количественно влияние ключевой мощности на энергетические процессы проявляется в соотношениях для действующих мощностей.

Определение 13. *Ключевая мощность (или мощность ключевого элемента) Q_{kl} есть величина, равная произведению действующих значений тока I и напряжения U на входе двухполюсника, если мгновенные значения $i(t)$ и $u(t)$ на его входе удовлетворяют условиям существования мгновенной ключевой мощности:*

$$Q_{kl} = \frac{1}{T} U_m I_m \left(\int_0^T \varphi_u^2 dt \int_0^T \varphi_i^2 dt \right)^{0,5},$$

где φ_u , φ_i удовлетворяют условиям (1.16).

Введение понятия ключевой мощности имеет принципиальное значение для исследования энергетических процессов в преобразовательных схемах.

Разновидностью реактивной мощности является уравнивательная мощность. В работе рассмотрен пример резистивной цепи с двумя источниками, синусоидальные напряжения которых сдвинуты относительно друг друга. Показано, что в одном источнике ток отстаёт, а в другом опережает напряжение на угол α . Поэтому в первом источнике есть реактивная мощность q_{r1} индуктивного характера, а во втором q_{r2} - ёмкостного. Вне источников, в нагрузке R , выделяется чисто активная мощность.

Поскольку энергетические характеристики цепи определяются её электрическим сопротивлением, в п.1.6 введены определения, уточняющие понятия электрического сопротивления в связи с введенными понятиями составляющих мощности.

Определение 14. *Электрическое сопротивление двухполюсника есть величина, равная отношению мгновенного или действующего напряжения к мгновенному или действующему току на входе. Обратная величина является электрической проводимостью. Поскольку напряжение и ток двухполюсника могут быть разложены на составляющие, то, очевидно, сопротивление двухполюсника также должно представляться в виде суммы соответствующих составляющих.*

Определение 15. *Активное сопротивление двухполюсника есть величина, равная отношению мгновенной активной мощности на входе пассивного двухполюсника к квадрату мгновенного тока. Обратная величина является активной проводимостью цепи.*

В соответствии с этим определением активное сопротивление двухполюсника определяется выражениями:

$$r = p_u / i^2 = P_u / I^2 = u_a / i = U_a / I = (d_a / d_i)^2 U_m / I_m.$$

Аналогично определяется активная проводимость:

$$y = p_i / u^2 = P_i / U^2 = i_a / u = I_a / U = (d_a / d_u)^2 I_m / U_m = 1/r.$$

Определение 16. *Кажущееся электрическое сопротивление двухполюсника есть величина, равная отношению кажущейся мощности к квадрату действующего значения тока на входе двухполюсника. Обратная величина есть кажущаяся электрическая проводимость:*

$$Z = \frac{S}{I^2} = \frac{U}{I} = \frac{d_u}{d_i} \frac{U_m}{I_m}; \quad Y = \frac{S}{U^2} = \frac{I}{U} = \frac{d_i}{d_u} \frac{I_m}{U_m}.$$

Определение 17. *Пассивное электрическое сопротивление двухполюсника есть величина, равная отношению пассивной мощности к квадрату действующего значения тока на входе двухполюсника. Обратная величина есть пассивная электрическая проводимость:*

$$X = Q / I^2 = \sqrt{S^2 - P^2} / I^2 = \sqrt{\left(\frac{S}{I^2}\right)^2 - \left(\frac{P}{I^2}\right)^2} = \sqrt{Z^2 - R^2};$$

$$B = Q / U^2 = \sqrt{S^2 - P^2} / U^2 = \sqrt{\left(\frac{S}{U^2}\right)^2 - \left(\frac{P}{U^2}\right)^2} = \sqrt{Y^2 - G^2}.$$

Определение 18. *Реактивное электрическое сопротивление двухполюсника есть величина, равная отношению реактивной мощности к квадрату действующего значения тока на входе двухполюсника. Обратная величина есть реактивная электрическая проводимость двухполюсника:*

$$X_r = Q_r / I^2 = \frac{U_r}{I}, \quad B_r = Q_r / U^2 = \frac{I_r}{U}.$$

Поскольку реактивная мощность в цепи может быть индуктивной или емкостной, реактивное сопротивление при несинусоидальной токе и напряжении также может быть индуктивным или емкостным, полностью совпадающим с общепринятыми значениями. В общем случае для определения сопротивления цепи необходимо определить соответствующую составляющую мощности. Отсюда определяются и знаки всех сопротивлений.

Определение 19. *Электрическое сопротивление искажения двухполюсника есть величина, равная отношению мощности искажения к квадрату действующего значения тока на входе двухполюсника. Обратная величина есть электрическая проводимость искажения:*

$$X_d = Q_d / I^2; \quad B_d = Q_d / U^2.$$

Определение 20. *Ключевое электрическое сопротивление двухполюсника есть величина, равная отношению ключевой мощности к квадрату действующего*

значения тока на входе двухполюсника. Обратная величина есть ключевая электрическая проводимость:

$$X_k = Q_k / I^2 = U_k / I; \quad B_k = Q_k / U^2 = I_k / U.$$

Отсюда для периодического процесса с несинусоидальными токами и напряжениями

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X^2}}; \quad P = \frac{RU^2}{Z^2} = \frac{RU^2}{R^2 + X^2}; \quad Q = \frac{XU^2}{Z^2} = \frac{XU^2}{R^2 + X^2}.$$

Найденные значения Z , R и X в общем случае справедливы только для заданного режима и при изменении режима должны быть пересчитаны.

В заключительном п.1.7 рассмотрены общие методы расчета энергетических процессов в сложных цепях. Показано, что общая последовательность энергетического расчёта сложной электрической цепи может содержать следующие этапы:

- расчёт полных мощностей всех элементов схемы и проверка баланса полных мощностей;
- расчёт распределения составляющих мощности в участках цепи, содержащих только последовательное или только параллельное соединение элементов;
- расчёт распределения составляющих мощности в ветвях схемы;
- расчёт распределения составляющих мощности в независимых контурах схемы;
- расчёт баланса составляющих мощности в узлах схемы.

В работе представлены алгоритмы расчёта составляющих мощности на всех этапах полного расчёта распределения мощностей в сложных схемах. Приведены формулы для определения мгновенных и кажущихся составляющих мощности и уравнения баланса для параллельного и последовательного соединения элементов, а также для узлов, ветвей и контуров при произвольной заданной схеме цепи.

Во второй главе рассмотрены энергетические характеристики преобразователей. Получены формулы для определения коэффициентов мощности, рассмотрены зависимости потерь и КПД от пассивной мощности, рассмотрены общие принципы компенсации пассивной мощности, приведена классификация энергетических процессов.

Коэффициенты активной $\lambda_a = P/S$ и пассивной $\lambda_\pi = Q_\pi/S$, $\lambda_a^2 + \lambda_\pi^2 = 1$ мощности характеризуют работу источников энергии. По отношению к мгновенным значениям активной и пассивной составляющих полной мощности ту же роль выполняют коэффициенты R_3 и G_3

$$R_3 = \left(\frac{d_a}{d_i} \right)^2 \frac{U_m}{I_m}; \quad G_3 = \left(\frac{d_a}{d_u} \right)^2 \frac{I_m}{U_m}.$$

Мгновенные напряжение и ток любого двухполюсника могут быть записаны в виде разложения на активные и пассивные составляющие

$$u = u_a + u_\pi = R_3 i + u_\pi; \\ i = i_a + i_\pi = G_3 u + i_\pi,$$

откуда следует

$$s = ui = R_3 i^2 + u_\pi i = G_3 u^2 + u i_\pi.$$

При эквивалентировании активных двухполюсников коэффициенты R_3 и G_3 могут быть отрицательны.

На примере токового и напряженческого эквивалентов рассмотрены наиболее общие зависимости потерь от пассивной мощности (величины x). Показано, что влияние источника пассивной мощности на потери в обеих схемах одинаково. Во всех случаях включение пассивного сопротивления снижает величину потерь, эквивалентируемых резистором, включённым последовательно с источником пассивной мощности.

Рассмотрены общие принципы компенсации пассивной мощности. Указано, что задача выбора схемы и расчёта фильтрокомпенсирующего устройства сводится к определению воздействий, уменьшающих или сводящих к нулю пассивные составляющие тока и напряжения в заданной точке (сечении) цепи.

В наиболее общем виде задача компенсации пассивной мощности формулируется следующим образом. Для некоторого сечения цепи заданы мгновенные токи, напряжения, мощности и их составляющие

$$\begin{aligned} s &= u(i_a + i_\pi) = (u_a + u_\pi)i; & i_\pi &= i_r + i_d; & u_\pi &= u_r + u_d; \\ q_\pi &= q_r + q_d; & q_{ri} &= u_i i_r; & q_{di} &= u_i i_d; & q_{ru} &= u_r i; & q_{du} &= u_d i; \\ p_i &= u_i i_a; & p_u &= u_a i; & s &= p_u + q_{ru} + q_{du} = p_i + q_{ri} + q_{di}. \end{aligned}$$

Для кажущихся мощностей

$$S^2 = P^2 + Q_r^2 + Q_d^2.$$

При этих условиях требуется определить пассивную мощность q_c или Q_c некоторого дополнительного источника (активного или пассивного), подключаемого в данном сечении цепи таким образом, чтобы обеспечить равенство нулю пассивной составляющей мощности. Введен коэффициент компенсации $k_c = -q_c / q_\pi$, который изменяется от 0 до $k_{c \max}$. Величина $k_{c \max}$ определяется техническими характеристиками (диапазоном регулирования) конкретного устройства. При $k_c = 0$ компенсации отсутствует. При $k_c = 1$ наступает режим полной компенсации. При $k_c < 1$ наступает режим неполной компенсации, а при $k_c > 1$ – перекомпенсации.

Для кажущихся мощностей:

$$S^2 = P^2 + (1 - k_c)^2 Q_\pi^2 = P^2 + (1 - k_c)^2 (Q_r^2 + Q_d^2) = P^2,$$

откуда условием полной компенсации является действительно выполнение равенства $k_c = 1$. Выведены уравнения компенсации для компенсаторов напряжения и тока и исследованы особенности каждой схемы компенсации.

Общая теория энергетических процессов позволила создать универсальную систему классификации, охватывающую все виды энергетических процессов в преобразовательных установках.

В главе третьей приведены примеры исследования общих свойств преобразователей. В п.3.1 исследуются энергетические свойства последовательного включения несинусоидальных источников тока и напряжения. Этот пример иллюстрирует физическое содержание введенных энергетических понятий. В цепи рис. 3.1 отсутствуют резисторы и накопители и содержатся только источники несинусоидального тока $i = I_m \varphi_i$ и несинусоидального напряжения $e = U_m \varphi_e$, включенные через контакты реле k_1, k_2, k_3, k_4 , которые могут включаться по разным временным программам. Проанализированы два режима работы схемы. В первом режиме при плавном изменении сдвига тока относительно напряжения можно плавно перейти

из режима чисто активной мощности в режим чисто реактивной. Во втором режиме обеспечивается плавный переход в режим чисто ключевой мощности

В п.3.2. рассмотрены энергетические свойства электрической цепи, состоящей из источника постоянной ЭДС $e = E = \text{const}$ с внутренним сопротивлением R_r ,

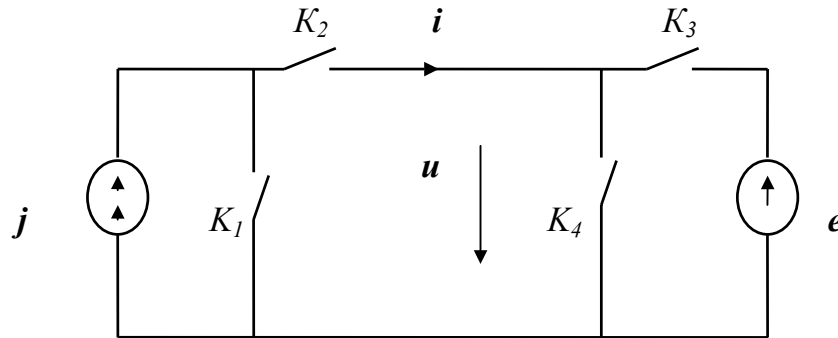


Рис. 3.1

и нагрузки в виде переменного резистора $R_n(t)$ (рис. 3.2). Энергетические процессы рассмотрены для трёх вариантов цепи: чисто резистивная цепь, та же цепь с индуктивностью и с ёмкостью. В данном примере на основе точных математических решений в предельно наглядной форме иллюстрируется взаимодействие активной, реактивной, искажающей и ключевой составляющих мощности, влияние составляющих пассивной мощности на активную, потери и КПД. Данный пример является моделью, отражающей свойства преобразователей тока и напряжения.

Электрическая цепь с переменным резистором. В данной схеме отсутствуют накопители энергии, поэтому реактивная мощность отсутствует. Однако, вследствие действия ключевого элемента ток и напряжение в источнике энергии, на нагрузке и в узле, к которому подключен контакт K , не изоформны. Пассивная составляющая в данном случае является ключевой мощностью. Приведены формулы для коэффициентов активной λ_a и пассивной λ_π мощности и всех составляющих мгновенной и кажущейся мощности.

Источником (причиной возникновения) пассивной мощности в данной цепи является ключевой элемент K . Кажущаяся мощность его S_k отлична от нуля и равна ключевой мощности Q_k , поскольку $\lambda_{ак}=0$ и $\lambda_{пк} = 1$. Ключевой элемент не потребляет и не отдает никакой энергии, поэтому выражение “протекает ключевая мощность или энергия” не следует понимать буквально. В узле ключевая мощность суммируется с активной мощностью резистора r_π . Эта же величина ключевой мощности присутствует на клеммах нагрузки и в приемнике ключевой мощности - в источнике ЭДС: $Q_e=Q_{кле}$, $Q_n=Q_{кln}$, $Q_{кл}=Q_{dкл}$ и $Q_{кле}=Q_{кln}=Q_{клк}=r_\pi Y_{\delta 1} Y_{\delta 2} E^2$. Ключевая мощность зависит от величины τ_1 и τ_2 . При τ_1 равном нулю или единице, $Q_{кл}$ обращается в нуль. Максимальное значение ключевая мощность получает при $\tau_1=\tau_2 = 0,5$, когда активная мощность приобретает минимум.

Электрическая цепь с переменным резистором и индуктивностью. Исследуются энергетические процессы в этой же электрической цепи при включении последовательно с источником ЭДС индуктивности L , которая выполняет роль простейшего фильтра на выходе источника питания. Введение в схему большой индуктивности приводит к тому, что коэффициент активной мощности источника

энергии λ_{ae} становится равным единице, и источник загружается чисто активной мощностью. Это происходит вследствие того, что в источнике реактивная мощность индуктивности вычитается из равной ей ключевой мощности контакта. Компенсация ключевой мощности с помощью последовательного включения индуктив-

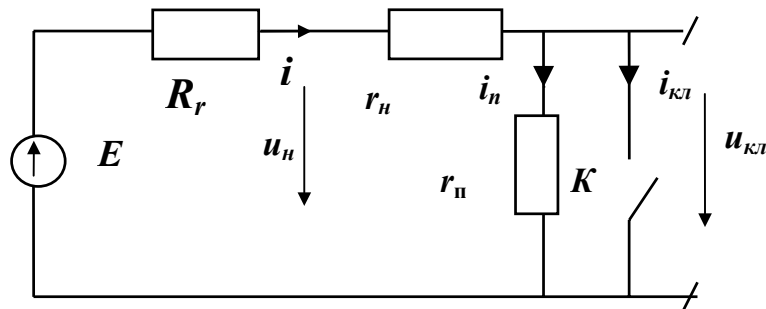


Рис.3.2.

ности повышает коэффициент активной мощности до единицы, однако величина активной мощности при этом снижается. В данной схеме индуктивность в одну половину периода получает энергию от источника ЭДС, а во вторую отдает запасенную энергию нагрузке. Источник ЭДС отдает энергию нагрузке в течение обоих интервалов, но в разных количествах.

Электрическая цепь с переменным резистором и емкостью. Далее рассмотрены энергетические процессы при включении на выходе источника питания емкости. При включении емкости источник энергии также загружается чисто активной мощностью. Однако в отличие от второй схемы, здесь ток источника увеличивается. Энергия источника на интервале разомкнутого контакта поступает в нагрузку и запасается в емкости. На интервале замкнутого контакта емкость отдает запасенную энергию нагрузке.

В п. 3.3. рассматриваются энергетические процессы в цепи с электрической дугой (нелинейным сопротивлением). Данный пример имеет принципиальное значение, поскольку в нем рассматривается цепь с нелинейным элементом.

Схема замещения цепи с электрической дугой показана на рис. 3.3. Электрическая дуга характеризуется двумя параметрами - напряжением зажигания $\pm U_3$ и напряжением горения $\pm U_r$.

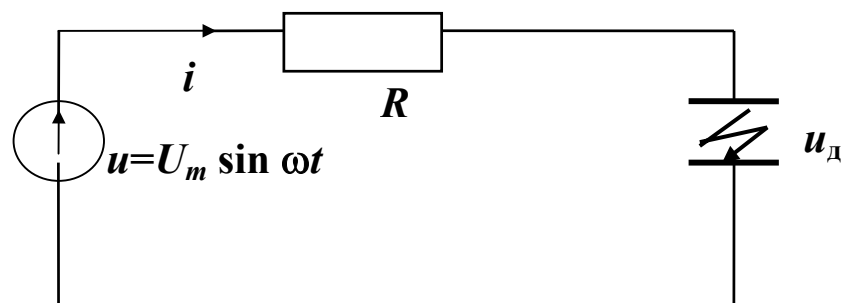


Рис. 3.3.

При сделанных допущениях напряжение источника u , напряжение и ток дуги u_d, i описываются следующими выражениями:

$$u = U_m \sin \omega t = U_m \sin \eta ;$$

$$u_d = \begin{cases} U_m \sin \eta; & \text{при } 0 \leq \eta \leq \alpha, \quad \pi - \delta \leq \eta \leq \pi + \alpha, \\ & 2\pi - \delta \leq \eta \leq 2\pi; \\ U_r; & \text{при } \alpha \leq \eta \leq \pi - \delta, \quad \pi + \alpha \leq \eta \leq 2\pi - \delta. \end{cases}$$

$$i = \begin{cases} G(u - U_r); & \text{при } \alpha \leq \eta \leq \pi - \delta, \quad \pi + \alpha \leq \eta \leq 2\pi - \delta, \\ 0, & \text{при } 0 \leq \eta \leq \alpha, \quad \pi - \delta \leq \eta \leq \pi + \alpha, \quad 2\pi - \delta \leq \eta \leq 2\pi. \end{cases}$$

Активная мощность дуги: $P_d = D_{ад}^2 = \pi^{-1} G U_r [U_m (\cos \alpha + \cos \delta) - U_r (\pi - \delta - \alpha)]$. Кажущаяся мощность дуги $S_d = U_d I$. Пассивная мощность дуги $Q_d^2 = S_d^2 - P_d^2$.

Активное сопротивление дуги изменяется весьма существенно: от бесконечности (при погасании) до некоторого минимума при максимальном токе.

Проверкой установлено, что в цепи соблюдаются балансы для активных и пассивных мощностей. Активная мощность источника энергии равна сумме активных мощностей резистора и дуги, а пассивная мощность дуги равна пассивной мощности источника энергии: $P_u = P_R + P_d$. $Q_d = Q_u$.

Таким образом, получено точное решение для мгновенных и действующих значений активных и пассивных составляющих мощности для всех элементов цепи и установлен баланс всех составляющих мощности между элементами цепи. Решение может быть легко получено и для случая источника энергии, имеющего произвольную форму напряжения. Таким образом, для излагаемой теории ничего принципиально нового нелинейное сопротивление не представляет.

В п.3.4. рассмотрен парадокс активной нагрузки, суть которого состоит в том, что в цепи, содержащей только резистор и вентиль, якобы может появляться сдвиг первой гармоники тока относительно питающего напряжения, т. е. появляется реактивная мощность, хотя накопители в цепи отсутствуют. Объяснение этого явления носит принципиальный характер, поэтому данная задача рассмотрена максимально подробно.

Уравнения для мгновенных значений тока и напряжения

$$e = E_m \sin \theta ;$$

$$i = \begin{cases} GE_m \sin \theta; & \text{при } \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2; \\ 0; & \text{при } \theta_2 \leq \theta \leq \theta_1 + \pi. \end{cases} = GE_m \sin \theta [1, 0];$$

$$u_b = \begin{cases} 0; & \text{при } \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2; \\ E_m \sin \theta; & \text{при } \theta_2 \leq \theta \leq \theta_1 + \pi. \end{cases} = E_m \sin \theta [0, 1], \quad (\text{где } G = 1/R).$$

Активная составляющая напряжения e_a равна напряжению на активном сопротивлении, а пассивная - напряжению на вентиле. Полная s , активная p и пассивная q мощности источника:

$$s = e i = GE_m^2 \sin^2 \theta [1, 0]; \quad p = e_a i = GE_m^2 \sin^2 \theta [1, 0];$$

$$q = e_\pi i \equiv 0; \quad s = p.$$

Пассивная составляющая мгновенной мощности источника равна ключевой мощности вентиля. Полная мощность источника s вследствие этого в любой момент времени равна активной мощности, потребляемой в резисторе. Хотя полная мощность и равна мгновенной активной мощности, но она не является чисто активной, поскольку в источнике формы тока и напряжения не совпадают. В то же время форма мгновенной активной мощности источника совпадает с формой мгновенной активной мощности на резисторе, поскольку они включены последовательно. Одновременное удовлетворение этих двух условий обеспечивается ключевой мощностью. При переходе к действующим значениям получаем $S^2 = P^2 + Q_{\text{кл}}^2 \neq P_R^2$, т. е. кажущаяся мощность источника действительно не является чисто активной и содержит ключевую составляющую. Пассивное сопротивление вентиля

$$X_B = U_3 / I_3 = R \{ [\tau_0 - 0,25\pi^{-1} (\sin 2\theta_2 - \sin 2\theta_1)]^{-1} - 1 \}$$

зависит от интервала $\tau_0 = (\theta_2 - \theta_1) / 2\pi$ и изменяется в пределах от 0 (при $\tau_0 = 1$) до $X_{\text{max}} = \infty$ (при $\tau_0 = 0$). Пассивное сопротивление вентиля X_B не должно ассоциироваться с какими-либо процессами запасаения энергии в цепи, поскольку оно является чисто ключевым. Ключевое сопротивление вентиля X_B выполняет функции ограничения тока без какого-либо накопления энергии в цепи. Таким образом, источник загружен мгновенной чисто активной мощностью $s = p_u$, поскольку $q \equiv 0$.

Полученное решение сопоставляется с обычным решением при разложении на гармонические составляющие тока источника. В обычном решении ключевая составляющая в токе отсутствует, и полный пассивный ток i_π состоит из реактивной i_r и искажающей составляющих $i_\pi = i_r + i_d$. То-есть здесь не получается разложение полной мощности на составляющие, присущие реальным элементам схемы замещения. Реактивная мощность в источнике появляется только при включении фильтров. Без фильтров изменение углов θ_1, θ_2 приводит только к изменению активной и ключевой мощности источника. Мгновенная мощность источника энергии в любой момент времени равна мощности резистора, что можно истолковать только как отсутствие реактивной мощности. Поэтому парадокса активной нагрузки нет. Уменьшение активной мощности источника относительно кажущейся происходит под действием ключевой мощности вентиля. Такое простое и естественное объяснение невозможно получить при использовании частотных методов.

В четвертой главе приведены примеры расчётов энергетических процессов в преобразовательных установках, наиболее часто используемых для проверки расчётных методов.

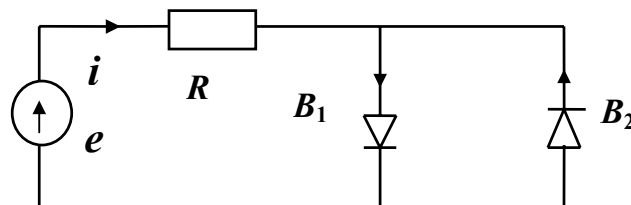


Рис. 4.1

В п. 4.1 рассмотрен выпрямитель с полностью управляемыми тиристорами. Такая цепь (рис. 4.1) широко используется как модель для изучения энергетических процессов при несинусоидальных токах и напряжениях. Здесь $e = E_m \sin \omega t$,

$G = 1/R = \text{const}$. Управляемые тиристоры B_1, B_2 эквивалентизируются идеальными ключевыми элементами. Изменением интервала приложения управляющего сигнала управляют величиной действующего тока в резисторе (нагрузке), т. е. мощностью, отдаваемой источником энергии в цепь. Управление мощностью источника происходит без затрат энергии в цепи на управление.

В режиме А тиристоры открыты на интервалах $[0, \alpha]$ и $[\pi, \alpha + \pi]$, а на интервалах $[\alpha, \pi]$ и $[\pi + \alpha, 2\pi]$ тиристоры закрыты. В режиме В тиристоры закрыты на интервалах $[0, \alpha]$ и $[\pi, \alpha + \pi]$ и открыты на интервалах $[\alpha, \pi]$ и $[\alpha + \pi, 2\pi]$. В закрытом состоянии тиристора ток равен нулю, при открытом состоянии мгновенный ток i равен $i(t) = GE_m \sin \omega t$.

Полная и мгновенная мощности источника энергии:

$$s_{eA} = ei_A = GE_m^2 \sin^2 \omega t [1, 0, 1, 0]; \quad s_{eB} = ei_B = GE_m^2 \sin^2 \omega t [0, 1, 0, 1].$$

$$p_{uA} = e_{uA} i_A = GE_m^2 \sin^2 \omega t [1, 0, 1, 0]; \quad p_{uB} = e_{uB} i_B = GE_m^2 \sin^2 \omega t [0, 1, 0, 1].$$

Мгновенная активная мощность резистора

$$p_{RA} = u_{RA} i_A = GE_m^2 \sin^2 \omega t [1, 0, 1, 0]; \quad p_{RB} = GE_m^2 \sin^2 \omega t [0, 1, 0, 1].$$

Полная мощность источника совпадает с мгновенной активной мощностью резистора. Таким образом, в цепи наблюдается полный баланс мгновенных мощностей.

Ключевая мощность тиристоров Q_T :

$$Q_{TA} = Q_{TB} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\left(\alpha - \frac{1}{2} \sin 2\alpha\right) \left(\pi - \alpha + \frac{1}{2} \sin 2\alpha\right)} GE_m^2.$$

Кажущаяся мощность тиристоров равна ключевой. Ключевая мощность в режиме А равна ключевой мощности режима В. При $\alpha = 0$ и $\alpha = \pi$ ключевая мощность тиристоров равна нулю. При $\alpha = \pi/2$ она достигает максимума

$$Q_{T \max} = \frac{1}{4} \sqrt{1 - \frac{1}{\pi^2}} GE_m^2 \approx \frac{1}{4} GE_m^2.$$

Активная мощность резистора

$$P_{RA} = GE_m^2 = G d_{iA}^2 E_m^2 = 0,5\pi^{-1} (\alpha - 1/2 \sin 2\alpha) GE_m^2;$$

$$P_{RB} = 0,5\pi^{-1} (\pi - \alpha + 1/2 \sin 2\alpha) GE_m^2.$$

Кажущаяся и активная мощности источника энергии

$$S_{eA} = EI_A = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\alpha - \frac{1}{2} \sin 2\alpha\right)} GE_m^2; \quad S_{eB} = \frac{1}{2} \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha} GE_m^2.$$

$$P_e = E_d I = d_a^2 GE_m^2 = d_i^2 GE_m^2, \quad \text{отсюда}$$

$$P_{eA} = \left[\frac{\alpha}{2\pi} - \frac{1}{4\pi} \sin 2\alpha \right] GE_m^2.$$

$$P_{eB} = \left[\frac{1}{2} \left(1 - \frac{\alpha}{\pi}\right) + \frac{1}{4\pi} \sin 2\alpha \right] GE_m^2.$$

Пассивная мощность источника (она же ключевая):

$$Q_{eA} = E_{\pi A} I_A = d_{iB} d_{iA} GE_m^2 = Q_{eB} = Q_{TA} = Q_{TB}$$

совпадает с ключевой мощностью тиристоров.

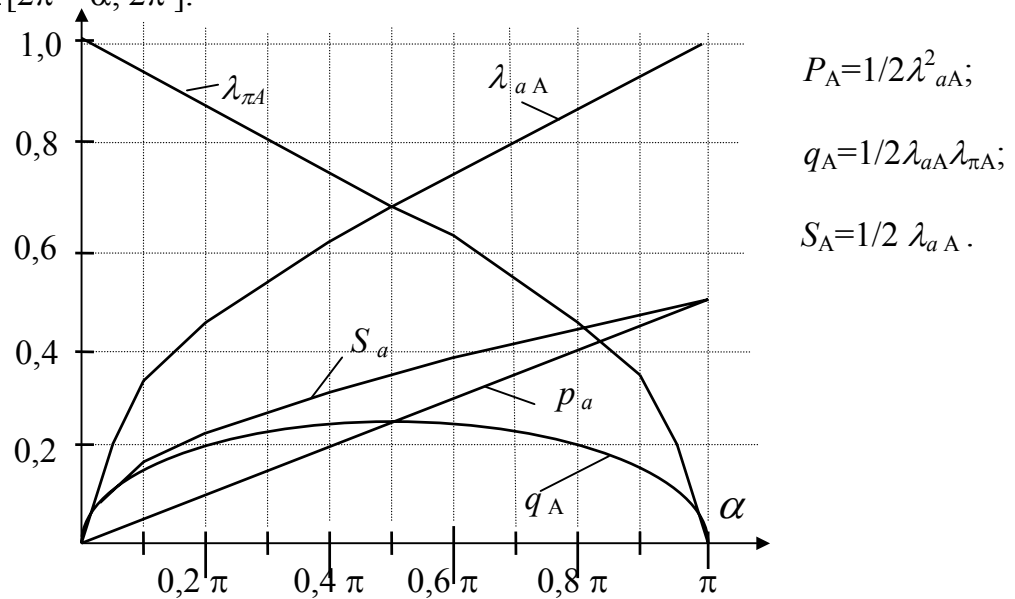
Мощность “по первой гармонике” является чисто активной. В источнике энергии помимо активной мощности присутствует только ключевая мощность. По-

скольку в данном случае гармонический состав ЭДС источника и тока (за вычетом первой гармоники) не совпадают, то ключевую мощность источника рассматривают как искажающую, хотя это противоречит физике процесса. Таким образом, рассмотрение процесса при разложении его во временной области обладает общим подходом и позволяет дать результатам наглядную физическую трактовку.

Основные параметры, характеризующие энергетический режим цепи, приведены на рис. 4.2. Энергетический КПД, понимаемый как отношение полезной работы к полной работе, совершаемой источником энергии, равен 100 % независимо от режима работы тиристоров. Мощностной КПД цепи η_p , понимаемый как отношение активной мощности источника к потенциально возможной активной мощности $\eta_p = P/S = \lambda_a$ изменяется в пределах $[0, 1]$ при изменении α в пределах $[0, \pi]$.

Анализ энергетических характеристик выполнен при питании цепи от источника синусоидальной ЭДС. Однако столь же эффективно анализ может быть выполнен и для источника энергии с произвольной формой ЭДС, причём усложнение расчётов незначительно.

В п. 4.2. рассмотрен двухполупериодный неуправляемый выпрямитель, работающий на против ЭДС. Для данной схемы (рис. 4.3) можно выделить пять интервалов непрерывности: $\theta_1 \in [0, \alpha]$; $\theta_2 \in [\alpha, \pi - \alpha]$; $\theta_3 \in [\pi - \alpha, \pi + \alpha]$; $\theta_4 \in [\pi + \alpha, 2\pi - \alpha]$; $\theta_5 \in [2\pi - \alpha, 2\pi]$.



$$P_A = 1/2 \lambda_{aA}^2;$$

$$q_A = 1/2 \lambda_{aA} \lambda_{\pi A};$$

$$S_A = 1/2 \lambda_{aA}.$$

Рис.4.2.

Уравнения мгновенных токов и напряжений имеют вид $u_C = U_m \sin \omega t = U_m \sin \eta$; $e = E = \text{const}$; $R = R_C$; $G = 1/R$;

$$i_c = \begin{cases} 0; & 0 \leq \eta \leq \alpha; \pi - \alpha \leq \eta \leq \pi + \alpha; 2\pi - \alpha \leq \eta \leq 2\pi; \\ G(u_C - e); & \alpha \leq \eta \leq \pi - \alpha; \\ G(u_C + e); & \pi + \alpha \leq \eta \leq 2\pi - \alpha. \end{cases} =$$

$$= [0, G(u_C - e), 0, G(u_C + e), 0];$$

$$i_1 = i_4 = G(u_C - e) [0, 1, 0, 0, 0]; \quad i_2 = i_3 = G(u_C + e) [0, 0, 0, 1, 0];$$

$$u_{B1} = u_{B4} = [0, 5(u_C - e); 0; 0, 5(u_C - e); -e; 0, 5(u_C - e)];$$

$$u_{B2} = u_{B3} = [-0,5(u_C - e); -e; -0,5(u_C - e); 0; -0,5(u_C - e)];$$

$$i_C = i_1 - i_2 = i_4 - i_3; \quad i_H = i_1 + i_3 = i_4 + i_2 = i_C; \quad \sin \alpha = E/U_m.$$

В режиме прерывистых токов формы мгновенных напряжений на всех элементах схемы, за исключением резистора R_C , не совпадают с формой мгновенных токов. Поэтому кажущаяся мощность равна активной только для резистора R_C . Кажущаяся мощность каждого из вентиляей по определению равна ключевой, а кажущиеся мощности источников напряжения u_C и противо ЭДС E содержат активную и пассивную составляющие.

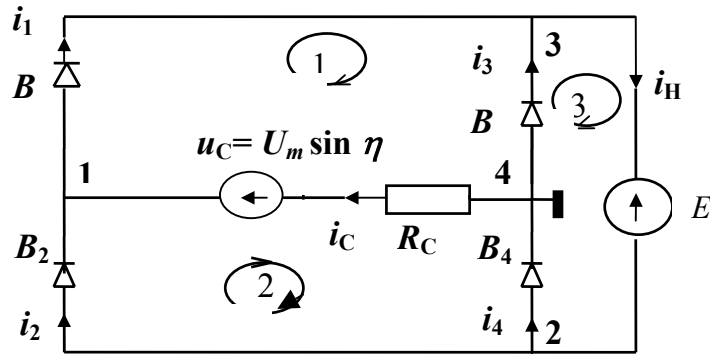


Рис.4.3

Определены активные составляющие мгновенной мощности источника энергии и нагрузки, мгновенные пассивные мощности источника и нагрузки, кажущиеся мощности источника S_e , резистора S_R , нагрузки S_H и вентилей S_B . Для каждого элемента цепи определены все составляющие мгновенной и действующей мощности. Для полного анализа энергетических свойств цепи рассмотрены балансы мощностей в узлах, ветвях и контурах заданной цепи.

В п. 4.3 приведена методика расчёта энергетических характеристик управляемого выпрямителя со средней точкой, предложенного акад. В. Ф. Миткевичем в 1901 г. Рассмотрению режимов этой схемы (рис.4.4) посвящена обширная литература, однако расчёты её энергетических характеристик продолжают дискутироваться. Поэтому в диссертационной работе выполнен полный анализ энергетических процессов в выпрямителе при двух типах нагрузки.

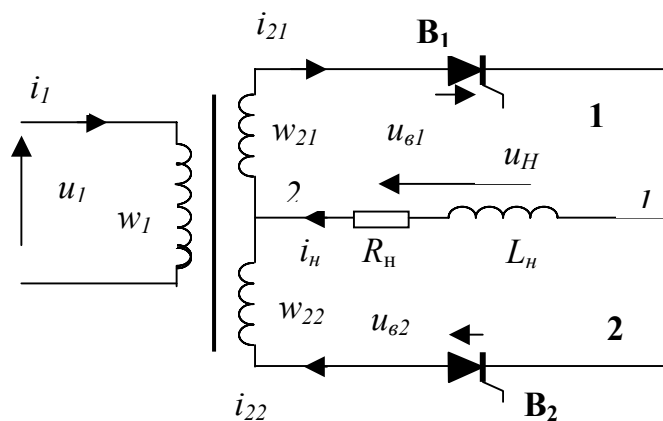


Рис. 4.4.

Соотношения установившегося режима выпрямителя, работающего на активную нагрузку, в относительных единицах:

$$\begin{aligned} u_I = u_{21} = u_{22} = \sin\theta; \quad u_{21} = u_{B1} + u_H; \quad u_{22} = u_{B2} - u_H; \\ i_H = i_{21} - i_{22}; \quad i_I = i_{21} + i_{22}; \quad u_H = i_H, \end{aligned}$$

При чисто активной нагрузке на периоде повторения в данной схеме имеются четыре интервала непрерывности:

$$\theta_1 = [0, \alpha]; \quad \theta_2 = [\alpha, \pi]; \quad \theta_3 = [\pi, \pi + \alpha]; \quad \theta_4 = [\pi + \alpha, 2\pi].$$

Тогда, выражая мгновенные значения через интервальную матрицу, получим

$$\begin{aligned} u_{B1} = u_I [1, 0, 1, 2]; \quad u_{B2} = u_I [1, 2, 1, 0]; \quad u_H = u_I [0, 1, 0, -1]; \\ i_I = u_I [0, 1, 0, 1]; \quad i_{21} = u_I [0, 1, 0, 0]; \quad i_{22} = u_I [0, 0, 0, 1]; \\ i_H = u_I [0, 1, 0, -1]; \end{aligned} \quad (4.1)$$

Из (4.1) действующие значения напряжений и токов

$$\begin{aligned} U_I^2 = U_{21}^2 = U_{22}^2 = 0,5; \quad U_{B1}^2 = U_{B2}^2 = 0,5 + A(\alpha); \quad U_H^2 = A(\alpha); \\ I_H^2 = I_1^2 = A(\alpha); \quad I_{21}^2 = I_{22}^2 = 0,5A(\alpha); \quad \text{где} \end{aligned}$$

$$A(\alpha) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u_H^2 d\theta = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \{u_I [0, 1, 0, -1]\}^2 d\theta = \frac{1}{2\pi} [\pi - \alpha + 0,5 \sin 2\alpha].$$

Получены точные выражения для составляющих мощности во всех элементах схемы, составлены уравнения балансов мгновенных мощностей в средней точке, во всех ветвях, контурах, трансформаторе и на входе схемы. Произведён расчёт и анализ энергетических характеристик выпрямителя, работающего на чисто активную нагрузку. Результаты расчёта сравниваются с результатами, получаемыми при использовании обычных методов расчёта по первой гармонике.

Расчёт энергетических процессов для активно-индуктивной нагрузки произведён при допущении, что величина индуктивности нагрузки столь велика, что изменениями тока нагрузки можно пренебречь. В таком режиме работы выпрямителя существуют только два интервала непрерывности: $\theta_1 = [\alpha, \pi + \alpha]$ и $\theta_2 = [\pi + \alpha, 2\pi + \alpha]$, когда включены соответственно вентиль В1 и вентиль В2. Уравнения установившегося режима в относительных единицах

$$\begin{aligned} u_I = u_{21} = u_{22} = \sin\theta; \quad u_H = u_I [1, -1] = \sin\theta [1, -1] \\ u_{B1} = 2 u_I [0, -1]; \quad u_{B2} = 2 u_I [1, 0]; \\ u_R = 2\pi^{-1} \cos \alpha; \quad u_L = u_I [1, -1] - 2\pi^{-1} \cos \alpha; \\ i_{21} = 1 [1, 0]; \quad i_{22} = 1 [0, -1]; \quad i_I = 1 [1, -1]; \quad i_H = I_H = I, \end{aligned}$$

где $i_H = I_H$ - выпрямленный ток:
$$I_H = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{2\pi + \alpha} u_H d\theta = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi + \alpha} \sin \theta d\theta = \frac{2}{\pi} \cos \alpha.$$

Действующие значения переменных

$$\begin{aligned} U_I^2 = U_{21}^2 = U_{22}^2 = U_H^2 = 0,5; \quad U_{B1} = U_{B2} = 1; \\ U_R = 2\pi^{-1} \cos \alpha; \quad U_L^2 = 0,5 - (2\pi^{-1} \cos \alpha)^2; \\ I_{21}^2 = I_{22}^2 = 0,5; \quad I_I = I_H = 1. \end{aligned}$$

На основании уравнений установившегося режима в работе произведён полный анализ мгновенных и действующих составляющих мощности в средней точке, контурах и трансформаторе. Показано, что в выпрямителе, нагруженном на активно-индуктивную нагрузку, кажущаяся мощность сетевой обмотки трансформатора равна кажущейся мощности нагрузки. Активная мощность, потребляемая из сети,

равна активной мощности нагрузки. Пассивная мощность сетевой обмотки трансформатора является чисто реактивной (т.е. мощность искажения отсутствует), поскольку она в точности равна реактивной мощности индуктивности нагрузки. Приведены регулировочные характеристики выпрямителя и соотношения, характеризующие работу выпрямителя при любых значениях угла α и индуктивности L .

Несинусоидальность токов преобразовательного трансформатора приводит к неправильным толкованиям кажущихся мощностей обмоток. Связь между мощностями первичной и вторичных обмоток трансформатора описывается соотношениями

$$S_1^2 = 2S_2^2 = P_1^2 + Q_1^2; \quad P_1 = 2P_2; \quad Q_1^2 = 2(Q_2^2 - P_2^2).$$

Эти соотношения исчерпывающим образом описывают взаимосвязи, существующие между составляющими мощности. Они имеют ясное физическое истолкование. Из этих соотношений вытекает, что вопреки некоторым утверждениям, потерь на высших гармониках в схеме нет и КПД выпрямителя (при принятых допущениях) равен 100%. Кажущаяся мощность первичной обмотки равна квадратичной сумме мощностей вторичных обмоток.

В пятой главе излагаются вопросы, посвященные приложению разработанной теории к измерению составляющих энергии и мощности в энергосистемах с мощными преобразователями. Мощные энергетические преобразователи работают в режиме непрерывного тока, поэтому, как было показано в четвертой главе, ключевая мощность на входе таких преобразователей отсутствует.

Выполнение функций управления оперативным оптовым рынком энергии и мощности возможно только при наличии соответствующей информационной системы, выдающей оператору режимную информацию высокой точности. Погрешности измерений в этой системе обуславливают появление «коммерческих» потерь, которые весьма внушительны. Особенности измерения и учёта реактивной энергии и мощности определяет общая тарифная политика. Коммерческий учёт реактивной электроэнергии и мощности производится для определения скидок и надбавок к тарифам на электроэнергию за компенсацию реактивной мощности и для расчётов по оплате перетоков реактивной мощности по межсистемным линиям электропередачи.

Для совершенствования системы измерения и учёта электроэнергии в настоящее время создаются автоматизированные системы контроля и учёта электроэнергии (АСКУЭ), основу которых составляют цифровые микропроцессорные счётчики энергии.

Точность измерений в АСКУЭ непосредственно на энергообъектах может быть доведена до десятой доли процента. При такой точности особую остроту приобретают вопросы анализа причин небаланса мощностей в сетях с искажёнными токами и напряжениями. Использование здесь понятия реактивной мощности, данного в ГОСТ применительно к синусоидальным процессам, неприемлемо. При высокой точности измерений в номинальном (синусоидальном) режиме в режиме с искажениями балансы могут не сходиться не из-за погрешности учёта высших гармоник, а принципиально, поскольку алгоритмы измерения активной, реактивной и искажающей мощностей должны быть принципиально различны. О точности элек-

тронных счётчиков энергии и ваттметров вообще нельзя сказать ничего определённого, не дав строгого определения величины, которую они должны измерять.

Рассмотрены основные принципы построения систем измерения энергетических показателей режима при наличии искажений посредством цифровой автоматизированной системы. Ввод измерительной информации в АСУ ТП непосредственно от объекта производится всегда в аналоговой форме от первичных измерительных преобразователей. Преобразование информации в цифровую форму производится в специальных аналого-цифровых преобразователях с привязкой к шкале Единого времени (для этого в измерительных комплексах используются сигналы навигационных систем типа Глонас или GPS).

Рассмотрен алгоритм разложения полной мощности на составляющие применительно к использованию в АСУ ТП. Пусть для некоторой точки энергосистемы заданы мгновенные напряжение и ток, которые при разложении на гармонические составляющие в трех частотных областях A , B и C имеют вид

$$u = \sum_A U_{k m} \sin(k \omega t + \alpha_k) + \sum_B U_{k m} \sin(k \omega t + \alpha_k) = u_A + u_B,$$

$$i = \sum_C I_{k m} \sin(k \omega t + \beta_k) + \sum_B I_{k m} \sin(k \omega t + \beta_k) = i_C + i_B;$$

где $BUA = \emptyset$; $BUC = \emptyset$; $AUC = \emptyset$.

Положив $\beta_k = \alpha_k + \Delta_k$, представим ток в виде трёх составляющих

$$i = \sum_C I_{k m} \sin(k \omega t + \beta_k) + \sum_B I_{k m} \sin \Delta_k \cos(k \omega t + \alpha_k) + \sum_B I_{k m} \cos \Delta_k \sin(k \omega t + \alpha_k) = i_C + i_{BC} + i_{BS}.$$

Показано, что составляющие u_B и i_{BC} имеют одинаковую форму. Тогда мгновенную мощность можно представить в самом общем случае в виде следующего разложения на составляющие:

$$s = (u_A + u_B)(i_C + i_{BC} + i_{BS}) = q_{dA} + q_{dBC} + q_{ri} + p_i$$

где $q_{dA} = u_A i$ - мощность искажения, обусловленная высшими гармоническими составляющими, принадлежащими только напряжению (область A);

$q_{dBC} = u_B i_C$ - мощность искажения, обусловленная высшими гармониками, принадлежащими только току (область C);

$q_{ri} = u_B i_{BC}$ - реактивная мощность;

$p_i = u_B i_{BS}$ - активная мощность.

Таким образом, в соответствии с принятыми определениями составляющих мощности, зная гармоническое разложение напряжения и тока, можно определить все составляющие полной мощности переменного тока при любом характере нагрузки и любой форме напряжения и тока. Использование разложения тока и напряжения на гармонические составляющие здесь используется только как вычислительный аппарат, а не в качестве определения самих составляющих.

В связи с отмечающимся неуклонным ростом мощностей нелинейных нагрузок и ухудшением вследствие этого качества электроэнергии, а также в связи с повышением точности учёта электроэнергии в коммерческих целях и необходимостью справедливого разделения платы за потери в сетях энергоснабжающих предприятий, проблема измерения, учёта и оперативного управления мощностью иска-

жения становится всё острее и интенсивно обсуждается в мировой литературе. В США налажен выпуск специальных счётчиков, регистрирующих отдельно реактивную и искажающую мощности. Наиболее острую форму эта проблема имеет сейчас в практике эксплуатации мощных преобразовательных установок. Для определения мощности искажения необходимо определить действующие значения искажающих составляющих напряжения U_A и тока I_C :

$$Q_d^2 = U_A^2 I^2 + U_B^2 I_C^2 = U^2 I_C^2 + U_A^2 I_B^2,$$

где

$$U_A^2 = \frac{1}{T_0} \int_0^T u_A^2 dt; \quad U_B^2 = \frac{1}{T_0} \int_0^T u_B^2 dt; \quad I_C^2 = \frac{1}{T_0} \int_0^T i_C^2 dt; \quad I_B^2 = \frac{1}{T_0} \int_0^T i_B^2 dt.$$

Мощность искажения Q_d можно выразить через действующие значения I , U и искажающие составляющие I_C , U_A :

$$Q_d^2 = U_A^2 I^2 + (U^2 - U_A^2) I_C^2 = U^2 I_C^2 + U_A^2 (I^2 - I_C^2).$$

Баланс всех составляющих мощности имеет вид:

$$\begin{aligned} S^2 &= U^2 I^2 = (U_A^2 + U_B^2)(I_C^2 + I_B^2) = \\ &= U_A^2 I^2 + U_B^2 I_C^2 + U_B^2 I_B^2 = \\ &= U^2 I_C^2 + U_A^2 I_B^2 + U_B^2 I_B^2 = Q_d^2 + S_H^2 \end{aligned}$$

где $S_H^2 = U_B^2 I_B^2$ - кажущаяся мощность.

Кажущаяся мощность S_H может быть представлена в виде суммы активной и реактивной мощности:

$$S_H^2 = U_B^2 (I_{BC}^2 + I_{BS}^2) = (U_{BC}^2 + U_{BS}^2) I_B^2 = Q_r^2 + P^2.$$

Кажущаяся мощность S_H совпадает с кажущейся мощностью, существующей в сетях с синусоидальной нагрузкой. Чтобы подчеркнуть это и то, что в общем случае эта составляющая получается вычитанием мощности искажения из кажущейся $S_H = S - Q_d$, составляющую S_H можно назвать нормальной кажущейся мощностью.

Полный баланс всех составляющих кажущейся мощности имеет вид

$$S^2 = Q_d^2 + S_H^2 = Q_d^2 + Q_r^2 + P^2,$$

где Q - пассивная мощность $Q^2 = Q_d^2 + Q_r^2$.

Отсюда следует, что для определения всех составляющих действующей мощности в общем случае достаточно измерить действующие значения тока и напряжения I , U , их искажающие составляющие I_C , U_A и активную мощность P . После этого могут быть определены все составляющие мощности.

Соотношение для кажущейся мощности совпадает с аналогичным определением кажущейся мощности в американском национальном стандарте. Однако совпадение это чисто формальное, поскольку в стандарте США составляющие мощности определяются с помощью частотного метода, а не во временной области.

Действующие значения напряжения, тока и мощности можно отнести к категории оперативной информации, характеризующей установившийся энергетический режим на некотором интервале времени, в течение которого действующие

значения остаются постоянными. В действительности действующие значения S , P и Q являются функциями времени

$$S=S(nT)=S(\tau); \quad P=P(\tau); \quad Q=Q(\tau),$$

где $\tau = nT$ - время, исчисляемое в целых периодах. Поэтому для характеристики энергетического процесса на большом интервале времени (час, смена, сутки, неделя и т. д.) необходимо пользоваться некоторыми интегральными характеристиками.

Основной интегральной характеристикой режима за интервал времени $\delta t = t - t_0$ является активная энергия $W_P(t)$

$$W_P(t) = \int_{t_0}^t s d\tau = \int_{t_0}^t p(\tau) d\tau = \int_{t_0}^t P(\tau) d\tau$$

Поскольку при эксплуатационных колебаниях режима $S(\tau)$ и $Q(\tau)$ являются функциями времени, то для интегральной характеристики энергетического процесса на интервале $\delta t = t - t_0$ в работе предлагается ввести энергетические функции $\Phi_S(\delta t)$, $\Phi_P(\delta t)$ и $\Phi_Q(\delta t)$, которые определяются как определённые интегралы по интервалу δt от соответствующих составляющих мощности. Поскольку для любого момента времени τ имеем

$$S^2(\tau) = P^2(\tau) + Q^2(\tau) = P^2(\tau) + Q_r^2(\tau) + Q_d^2(\tau),$$

то для энергетических функций справедливо соотношение

$$\Phi_{S^2}(\delta t) = \Phi_{P^2}(\delta t) + \Phi_{Q^2}(\delta t) = \Phi_{P^2}(\delta t) + \Phi_{r^2}(\delta t) + \Phi_{d^2}(\delta t).$$

Для интервала δt введены интегральные коэффициенты мощности L_P , L_Q , L_r и L_d

$$L_P = \frac{\Phi_P(\delta t)}{\Phi_S(\delta t)}; \quad L_Q = \frac{\Phi_Q(\delta t)}{\Phi_S(\delta t)}; \quad L_r = \frac{\Phi_r(\delta t)}{\Phi_S(\delta t)}; \quad L_d = \frac{\Phi_d(\delta t)}{\Phi_S(\delta t)},$$

для которых $L_P^2 + L_Q^2 = L_P^2 + L_r^2 + L_d^2 = 1$.

Энергетическая функция $\Phi_{S^2}(\delta t)$ и её составляющие имеют размерность энергии, однако эта энергия не совпадает с обычной активной и реактивной энергией W_P и W_Q , измеряемой соответствующими счётчиками.

Система измерений для контроля установившихся режимов является важной частью автоматизированных систем управления технологическими процессами подстанций. Проанализированы все составляющие измерительного тракта и даны рекомендации по его построению. Приведены алгоритмы вычисления коэффициентов мощности и энергетических функций. Подобная система измерений основных электрических и энергетических величин для подсистемы контроля установившихся режимов была испытана в АСУ ТП на Выборгской преобразовательной подстанции и на мощном преобразовательном стенде в Белом Расте.

Исследования, проведённые НИИПТ на АСУ ТП Выборгской ВИП и испытательного стенда в Белом Расте, показали, что суммарная погрешность измерительных каналов составляет 3 - 4,5 %. Однако для некоторых параметров суммарная погрешность значительно выше. Наибольшая погрешность у мощности (особенно реактивной). Поэтому в АСУ ТП должна быть задействована специальная

система контроля точности измерительных каналов, которая в процессе эксплуатации должна выявлять ухудшение точности и сигнализировать об этом. Эта система должна обеспечивать повышение точности в первую очередь энергетических показателей.

Для повышения надёжности и качества информации в работе рассмотрено использование методов оценки состояния в АСУ ТП преобразовательной подстанции, которые позволили улучшить оптимизацию энергетического процесса на подстанции по минимуму потерь. Были разработаны и внедрены программы оптимизации режима дежурным персоналом.

Заключение

1. Основные научные результаты диссертационной работы:

1.1 Создание теории периодических энергетических процессов в электрических системах с несинусоидальными периодическими токами и напряжениями, основанной на использовании метода ортогональных разложений мгновенных напряжений и токов во временной области и являющейся дальнейшим развитием системного подхода в существующих методах расчёта энергетических процессов в линейных и нелинейных цепях. Созданная теория является органическим продолжением существующих методов и средств исследования энергетических процессов в преобразовательных установках. Общая часть теории охватывает наиболее существенные закономерности, присущие электрическим системам любого вида, и включает в свой состав

- математическую модель физических процессов в электрических системах на основе допущений, принятых в теории электрических цепей;

- систему основных понятий, опирающуюся на общую физическую основу и концептуальную базу и дополненную точными математическими методами решения;

- определения составляющих мгновенной мощности: полной, активной, пассивной, а также составляющих мгновенной пассивной мощности - мгновенных реактивной, ключевой и искажающей. Для каждой составляющей мгновенной мощности дано строгое математическое определение, проанализировано их физическое содержание и роль в энергетических процессах, указаны источники возникновения каждой составляющей и их взаимодействие с другими составляющими полной мгновенной мощности;

- определения составляющих кажущейся мощности – активной и пассивной, а также составляющих пассивной мощности: реактивной, искажающей и ключевой. Проанализировано содержание каждой составляющей, их связь с составляющими мгновенной мощности и роль во всём энергетическом процессе;

- определения понятий электрического сопротивления. В соответствии с новыми определениями составляющих кажущейся мощности введены определения кажущегося, активного, пассивного, ключевого, реактивного и искажающего сопротивлений, проанализирована роль каждого сопротивления и их взаимосвязи.

1.2. Разработка универсальных методов расчёта энергетических процессов в преобразовательных установках. Методы расчёта включают расчётные соотношения для вычисления составляющих мощности, проверки баланса составляющих мощности в узлах, контурах и ветвях цепи.

1.3. Научное обоснование практических методов и алгоритмов минимизации потерь и пассивной мощности, измерений энергии и мощности в несинусоидальных процессах.

2. Научная новизна основных положений энергетической теории.

2.1. Предложен единый системный метод определения всех составляющих мощности, основанный на рассмотрении физических процессов в преобразователях. Математическая модель теории включает методы ортогональных разложений напряжений и токов во временной области, дополненные оригинальным матричным методом расчета установившихся процессов в преобразовательных установках. Разработанная теория является развитием существующих методов расчета синусоидальных процессов, но имеет более широкую область применения, охватывающую широкий класс несинусоидальных процессов.

2.2. Предложено понятие ключевой мощности и даны строгие определения известных составляющих мощности – активной, реактивной и искажающей. Введение понятия ключевой мощности имеет принципиальное значение для всей теории, поскольку позволяет объединить разнородные понятия всех составляющих мощности в единую систему взглядов и понятий.

2.3. Разработаны алгоритмы расчёта составляющих мощности, носящие универсальный характер и представляющие собой дальнейшее логическое развитие существующих методов теории цепей в части расчёта периодических энергетических процессов.

3. Методы исследования, достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы.

Все полученные результаты получены при общепринятых исходных допущениях при использовании точных математических методов решения, подтверждённых истолкованием физической сущности результатов, полученных формально-математическими преобразованиями. В работе использован метод аналогий, позволивший подтвердить результаты исследований электрических систем сопоставлением с более наглядными результатами в механических системах. Тем самым подтверждено, что полученные результаты носят общий характер и применимы не только к электрическим системам. Достоверность предложенной теории подтверждается полным совпадением ее результатов с результатами классической энергетической теории синусоидальных процессов, а также примерами применения предложенной методики расчёта к решению различных классов задач, связанных с исследованиями энергетических процессов.

4. Практическая и научная ценность результатов диссертационной работы.

Научная ценность основных результатов, полученных автором, заключается в создании энергетической теории преобразовательных установок, представляющую собой единую систему взглядов и методов, объясняющих общие закономерности энергетических процессов в разных системах с одних методологических позиций, подтверждённых примерами из практической деятельности.

Практическая ценность результатов заключается в создании единой методики расчёта энергетических процессов в электрических системах. Это подтверждено большим числом примеров, как имеющих теоретическую ценность для апробации разработанных методов, так и лежащих в области узко практического приме-

нения для расчётов энергетических показателей конкретных схем и оборудования. Практическая ценность предложенных методов проиллюстрирована на примерах

- решения нелинейных задач теории цепей,
- исследования различных схем силовой электроники,
- решения вопросов измерения электрической мощности и энергии в автоматизированных системах управления передачами и вставками постоянного тока.

5. Дальнейшее развитие теории периодических энергетических процессов в преобразовательных установках.

Развитие энергетической теории должно заключаться в разработке специальных разделов, посвященных выявлению особенностей многофазных систем, развитию машинных методов расчёта и разработке типовых программ универсального назначения, пригодных к использованию в различных существующих программных комплексах для расчета энергетических показателей схем и оборудования в эксплуатационных условиях.

Публикации по теме диссертации

1. Асанбаев Ю.А. Периодические энергетические процессы в электрических системах. СПб.; Политехника, 1997, -420 с.: ил.
2. Асанбаев Ю.А. Транспортная модель энергетических процессов в электрической цепи. Известия НИИ постоянного тока № 57, 2000, с.179-197.
3. Асанбаев Ю.А. Определение составляющих мощности методом разложения во временной области/ НИИ по передаче электр.энг.пост.током выс.напр.СПб, 2001.-30 с; ил.-Библиогр.;35 назв.-Рус.-Деп.в ВИНТИ 04.12.2001, №2499–В2001
4. Асанбаев Ю.А. Энергетический режим управляемого выпрямителя, работающего на активную нагрузку. Известия НИИ постоянного тока № 58, 2001, с.252-268.
5. Асанбаев Ю.А. Энергетические характеристики управляемого выпрямителя. Известия НИИ постоянного тока № 58, 2001, с.269-280.
6. Асанбаев Ю.А. Расчет энергетических характеристик управляемого выпрямителя при активно-индуктивной нагрузке/НИИ Пост. Тока.-Санкт-Петербург, 2001.27с.:ил.-Библиогр.:22 назв.-Рус.- (Деп.в Информэлектро №3-эт2001 от 19.09.2001)-
7. Асанбаев Ю.А. Энергетические процессы в управляемом выпрямителе при чисто активной нагрузке. НИИ Пост. Тока.-Санкт-Петербург, 2001.-26с.:ил.-Библ:24 назв.-Рус.- (Деп. в Информэлектро №4 – эт2001 от 19.09.2001)
8. Асанбаев Ю.А., Касаточкин А.А. О некоторых особенностях применения метода гармонического анализа к расчету режимов преобразовательных схем. – Известия НИИ постоянного тока № 58, 2001, с.269-20.
9. Асанбаев Ю.А., Садовникова Е.С., Филатов В.Г. Измерение составляющих мощности в АСУ действующими преобразовательными подстанциями. Тезисы докладов к совещанию «Преобразовательная техника в энергетике (ПТЭН-84)» Ленинград, 22-25 мая 1984 г., Москва, Минэнерго, ЦНТИ. 1984, с. 16.
10. Асанбаев Ю.А., Бородулин М.Ю., Гуревич А.Е., Карасёв Г.В.. Основные принципы построения системы управления преобразователями инверторной подстанции для промышленной электростанции с МГД-генератором. «8 международ-

ная конференция по МГД-преобразованию энергии». Москва, 12-18 сентября 1983, т.2, с.181-188.

11. Асанбаев Ю.А. Проблемы создания АСУ ТП преобразовательных подстанций, электропередач и вставок постоянного тока. Сборник научн. трудов НИИПТ «АСУ Тп крупных подстанций, электропередач и вставок постоянного тока». ГЭАИ, Лен. отд. 1991, с.3-21.

12. Асанбаев Ю.А., Филатов В.Г., Фаянс В.Г. Автоматизация управления преобразовательными подстанциями. Повышение эффективности мощных преобразователей. Сборник научн. тр. НИИПТ, ГЭАИ Лен. отд., 1989, с.129-137.

13. А.С. № 593574. Способ регулирования переменного напряжения в системе передачи постоянного тока и устройство для его осуществления. Асанбаев Ю.А., Карасёв Г.В., Метелица В.З., Филатов В.Г.

14. А.С. №1418871. Способ перевода однофазного вентильного преобразователя из инверторного режима работы в выпрямительный. Асанбаев Ю.А., Безносиков О.Б., Бородулин М.Ю.Б.И. №31, 23.08.88 г.

15. А.С. № 1554731. Устройство для перевода вентильного преобразователя из выпрямительного режима работы в инверторный. Асанбаев Ю.А., Безносиков О.Б., Бородулин М.Ю.Б.И. №33, 23.10.88 г.

16. А.С. N568054. Устройство для централизованного измерения параметров. Асанбаев Ю.А., Карасёв Г.В. Б.И. N29, 05.08.77.

17. Асанбаев Ю.А., Глезеров С.Н., Карасёв Г.В., Метелица В.З., Тележкина Н.П. Использование управляющих вычислительных машин при испытаниях полупроводниковых преобразователей на стенде. Испытания полупроводниковых преобразователей большой мощности. Сборник научн. тр. НИИПТ, ГЭИ., 1981, с.55-62.

18. Асанбаев Ю.А., Филатов В.Г. Измерение гармоник тока и напряжения с помощью управляющих вычислительных машин. Исследования и разработки мощных электропередач постоянного тока. Сборник научн. тр. НИИПТ, Ленинград, ГЭАИ, Лен. отд. 1983, с.100-104.

19. Асанбаев Ю.А., Горелик Т.Г. Применение теории оценивания состояния в задачах автоматизированных систем управления технологическими процессами электропередач и вставок постоянного тока. Автоматизированные системы управления технологическими процессами крупных подстанций, электропередач и вставок постоянного тока. Сб. научных трудов НИИПТ, ГЭАИ, Лен. отд. 1991. с.34-47.

20. Андреюк В.А., Асанбаев Ю.А., Сказываева Н.С. Системы автоматического управления установившимися и переходными режимами энергосистемы по абсолютному углу. Электрические станции, 1995, N12, с. 93-99.

21. Андреюк В.А., Асанбаев Ю.А., Сказываева Н.С. Технические требования к комплексу регистрации режимной информации в Системе Единого Времени. Известия НИИ Постоянного тока, N56, 1997, с.167-177.