

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ  
ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

На правах рукописи

СОСЯРВ Юрий Эдович

УМЕНЬШЕНИЕ ПУЛЬСАЦИЙ В ТИРИСТОРНЫХ РЕГУЛЯТОРАХ  
ПЕРЕМЕННОГО И ВЫПРЯМЛЕННОГО ТОКОВ НА ОСНОВЕ  
ЭЛЕМЕНТОВ С УПРАВЛЯЕМЫМ ЭНЕРГООБМЕНОМ

Специальность 05.09.12 – полупроводниковые  
преобразователи электроэнергии

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой  
степени кандидата технических наук

Киев - 1993

11.8 20.007

Диссертация выполнена в Институте энергетики АН Эстонии

Научный руководитель – кандидат технических наук,  
с.н.с. В.В. Сарв

Официальные оппоненты – доктор технических наук,  
с.н.с. К.А. Липковский

кандидат технических наук,  
с.н.с. М.Т. Стрелков

Ведущее предприятие – Рижский технический университет

Защита состоится "28" мая 1993 г. в 14 часов  
на заседании специализированного совета Д016.30.03 при Институте  
электродинамики АН Украины (252680, г. Киев-57, проспект Победы,  
56, тел. 446-91-15)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института  
электродинамики АН Украины.

Автореферат разослан "26" мая 1993 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета  
доктор технических наук

*Федий*

В.С. Федий

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00802631 (K)

Актуальность проблемы. Удельный вес электроэнергии, потребляемой в преобразованном виде, значителен и имеет тенденцию дальнейшего увеличения. Поскольку основными элементами различных преобразователей являются управляемые статические ключи, то их свойства во многом определяют качественные показатели и самих преобразователей. В частности, реальные преобразователи потребляют из питающей цепи искаженный высшими гармониками ток, а также загружают питающую сеть значительной реактивной мощностью и выдают потребителю, наряду с желаемой основной частотой, нежелательные высшие гармоники или субгармоники. В связи с этим проблемам электромагнитной совместимости (ЭМС) полупроводниковых преобразователей с сетью питания и нагрузкой уделяется большое внимание.

В диссертационной работе исследуются вопросы электромагнитной совместимости тиристорных регуляторов переменного и выпрямленного токов с сетью питания и нагрузкой с целью снижения нежелательных составляющих частотного спектра соответственно входного тока и выходного напряжения. Использование управляемых реактивных накопителей и межфазных трансформаторов открыло принципиально новые возможности для разработки силовых сглаживающих фильтров и малоискажающих полупроводниковых преобразователей параметров электрической энергии, в том числе регуляторов переменного и выпрямленного токов, и вместе с тем породило ряд научных задач, без решения которых эффективное применение управляемых реактивных накопителей и межфазных трансформаторов невозможно.

Работа выполнена в соответствии со следующими плановыми темами Отделения физико-технических проблем энергетики АН СССР п. 1.9.3.2. "Разработка основ синтеза оптимальных энергетических источников тока и сглаживающих фильтров (1976-1980), п. 1.9.6. "Электромагнитное совмещение полупроводниковых регуляторов выпрямленного и переменного токов с сетью питания и с нагрузкой" (1980-1985) и п. 1.9.2.4.2. "Разработка регулируемых вентильных преобразователей с улучшенными технико-экономическими показателями для электропитания электрофизических и электротехнологических установок" (1986-1990), п. 2.1.21. "Развитие теории и создание силовых активных фильтров, обеспечивающих электромагнитную совместимость в системах вторичного электропитания" (1989-1991).

Цель работы и задачи исследования. Целью диссертационной работы является новое решение научно-технической задачи построения малоскажающих регуляторов переменного и выпрямленного токов и сглаживающих фильтров на основе элементов с управляемым энергообменом, направленное на улучшение электромагнитной совместимости систем вторичного электропитания. Поставленная цель потребовала решения следующих задач:

- исследование различных схем трехфазных преобразователей переменного напряжения в регулируемые переменное или постоянное на базе управляемого межфазного трансформатора (автотрансформатора), выявление их особенностей, свойств и характеристик, разработка методики их проектирования;

- исследование однофазного источника переменного тока на базе индуктивного накопителя энергии с переключаемым числом витков, определение зависимости гармонического состава потребляемого из сети тока от величины индуктивности накопителя;

- исследование и разработка активных сглаживающих фильтров на базе импульсно-управляемых реактивных элементов, определение зависимости коэффициента фильтрации от параметров энергонакопительных элементов;

- определение основных параметров диссипативных активных (транзисторных) фильтров непрерывного действия с резистивно-индуктивной шунтирующей ветвью;

- опытная проверка и внедрение новых полупроводниковых регуляторов переменного и выпрямленного напряжения с улучшенной электромагнитной совместимостью.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использованы методы математического моделирования и гармонического анализа. В некоторых случаях анализ мгновенных значений переменных осуществлялся решением дифференциальных уравнений с применением методов припасовывания и численного интегрирования на ЭВМ, а по найденным мгновенным значениям тока и напряжения определялись интегральные характеристики схем. Проведены также экспериментальные исследования на лабораторных макетах и реальных устройствах.

Научная новизна. Предложены и исследованы новые структуры тиристорных регуляторов переменного и выпрямленного напряжений, содержащие индуктивный накопитель энергии или межфазный трансфор-

матор с секционированными обмотками и тиристорный коммутатор для ступенчатой модуляции числа витков этих обмоток, позволяющие за счет принудительного синтезирования формы кривых токов нагрузки и питающей сети существенно улучшить ЭМС как с сетью питания, так и нагрузкой. Предложены оригинальная схема однофазного индуктивно-ключевого регулятора переменного напряжения на базе импульсно-управляемого индуктивного накопителя энергии и ряд оригинальных схем трехфазных преобразователей переменного напряжения в регулируемые переменное и постоянное на базе межфазного трансформатора. Впервые получены аналитические выражения, описывающие характер изменения потребляемого из сети тока и условия коммутации ключей, что дает возможность проанализировать гармонический состав потребляемого из сети тока при разных углах управления. Определены ранее неизвестные зависимости величины выходного напряжения и гармонического состава потребляемых из сети токов в однофазном индуктивно-ключевом регуляторе переменного напряжения от конечной величины индуктивности, а в трехфазном регуляторе переменного напряжения — от постоянной времени нагрузки.

Предложены структуры силовых сглаживающих фильтров на основе импульсно-управляемых реактивных элементов, которые позволяют повысить эффективность процессов энергообмена и уменьшить установленную мощность энергонакопительных элементов фильтра. Исследованы особенности процессов энергообмена в индуктивных и индуктивно-емкостных фильтрах с импульсно-управляемыми сглаживающими дросселями и определены сглаживающие свойства таких фильтров.

Разработаны математические модели транзисторных фильтров непрерывного действия последовательного типа с резистивно-индуктивной шунтирующей ветвью, на основе которых определены частотная зависимость коэффициента фильтрации от параметров схемы, пути повышения к.п.д. фильтра и уменьшения установленной мощности регулирующих элементов.

Практическая ценность работы состоит в следующем:

— в результате выполненных исследований предложены новые схемы, защищенные авторскими свидетельствами СССР. В том числе: устройства для регулирования однофазного переменного напряжения (1 авт. св.) и трехфазного переменного напряжения (18 авт. св.), трехфазные преобразователи переменного напряжения в постоянное (4 авт. св.), фильтры для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения (6 авт. св.);

- сведенные в таблицы основные расчетные параметры для предложенных малоискажающих преобразователей переменного напряжения в регулируемые переменное и постоянное позволяют рассчитать трансформаторы, тиристорный коммутатор и выпрямительный мост по заданным исходным данным;

- получены зависимости для расчета элементов силовой схемы и системы управления фильтров для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения на основе импульсно-управляемых реактивных элементов и транзисторного фильтра непрерывного действия с активно-индуктивной шунтирующей ветвью.

Реализация результатов работы. Результаты работы использованы при проектировании и внедрении в эксплуатацию источников питания плазмотронов постоянного тока и сверхпроводящей магнитной системы лабораторного синхротрона в Институте энергетики и Институте физики АН Эстонии, соответственно.

Результаты работы использованы также в Центральном конструкторском бюро машиностроения ПО "Донец" (г. Луганск) при освоении малоискажающих вентильных преобразователей в технологическом оборудовании для выращивания кристаллов.

На защиту выносятся следующие основные положения:

1. Новые структуры малоискажающих вентильно-трансформаторных преобразователей переменного напряжения в регулируемое переменное и постоянное с улучшенной ЭМС на базе межфазного трансформатора или импульсно-управляемого индуктивного накопителя энергии и методика их расчета при активной нагрузке.

2. Результаты расчета величины выходного напряжения и гармонического состава потребляемых из сети токов в зависимости от конечной величины индуктивности в однофазном индуктивно-ключевом регуляторе переменного напряжения и от постоянной времени нагрузки в трехфазном регуляторе переменного напряжения.

3. Новые структуры силовых сглаживающих фильтров выпрямленного напряжения на базе импульсно-управляемых реактивных элементов и методика расчета индуктивных и индуктивно-емкостных фильтров с переключаемым числом витков обмотки сглаживающего дросселя.

4. Новые схемы транзисторных фильтров непрерывного действия последовательного типа с активно-индуктивной шунтирующей ветвью, расчетные соотношения энергетических параметров и частотная зави-

симость коэффициента фильтрации от параметров схемы.

#### Апробация работы.

Основные результаты диссертации докладывались автором и обсуждались на: научно-техническом совещании "Проблемы электромагнитного совмещения силовых полупроводниковых преобразователей", Таллинн, 1979; II Всесоюзной научно-технической конференции "Проблемы преобразовательной техники", Киев, 1979; научно-техническом совещании "Проблемы электромагнитной совместимости силовых полупроводниковых преобразователей", Таллинн, 1982; межотраслевой научно-технической конференции "Применение автоматизированных полупроводниковых преобразователей частоты для экономии материалов, трудовых и энергетических ресурсов в машиностроении", Уфа, 1983; III Всесоюзной научно-технической конференции "Проблемы преобразовательной техники", Киев, 1983; научно-технической конференции "Пути улучшения энергетических и массогабаритных показателей полупроводниковых преобразователей", Челябинск, 1985; III Всесоюзном научно-техническом совещании "Проблемы электромагнитной совместимости силовых полупроводниковых преобразователей", Таллинн, 1986; Всесоюзной научно-технической конференции "Автоматизация электротехнологических процессов в гибких производственных системах машиностроения на основе полупроводниковых преобразователей частоты", Уфа, 1987; IV Всесоюзной научно-технической конференции "Проблемы преобразовательной техники", Киев, 1987.

Доклады с основными результатами диссертации включены в программы и опубликованы в трудах следующих международных научно-технических конференций: V конференция по силовой электронике, Будапешт, 1985; VI конференция по силовой электронике и электроприводам, Будапешт, 1990; IV Европейская конференция по силовой электронике и по ее применению, Флоренция, 1991.

Публикации. По теме диссертации опубликованы 51 печатная работа, в том числе 8 статей, написанных автором единолично, и двадцать девять авторских свидетельств на изобретения.

#### Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Работа изложена на 228 страницах машинописного текста, включая 3 таблицы (3 стр.), 100 рисунков (51 стр.), список литературы из 170 наименований (20 стр.) и приложений (II стр.).

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности темы исследования, сформулирована цель работы, отмечена научная новизна, практическая значимость полученных результатов, изложены основные положения, выносимые автором на защиту.

В первой главе рассмотрены теоретические модели регуляторов переменного и выпрямленного токов и сглаживающих фильтров, построенных на базе управляемого индуктивного накопителя энергии или на базе управляемого межфазного трансформатора. При этом рассмотрено идеальное плавное изменение индуктивности или коэффициента трансформации, обеспечивающее полную сглаженность токов питающей сети и нагрузки. Таким путем определены предельные теоретически достижимые энергетические показатели, к которым показатели реальных устройств могут лишь приближаться.

Показано, что при "идеальном" фазовом управлении регулятора однофазного переменного напряжения регулирующий орган должен содержать индуктивный накопительный элемент (рис. 1), причем в общем случае накопленная в энергонакопительном элементе энергия должна отличаться от нуля. Рассмотрены две закономерности управления индуктивностью  $L$  при активной нагрузке и напряжении питания  $u = U_m \sin \omega t$ : во-первых, индуктивность регулируется в зависимости от угла управления  $L = \frac{R}{\omega} \operatorname{tg} \alpha$ , и во-вторых, индуктивность регулируется в зависимости как от угла управления, так и от времени

$$L = \left[ 1 + \frac{\kappa}{\sin^2(\omega t - \alpha)} \right] \frac{R}{\omega} \operatorname{tg} \alpha, \quad \text{где } \kappa = \frac{W_{L \text{ мин}}}{\Delta W_L} - \text{коэффициент,}$$

определяющий минимальный запас энергии в дросселе. Управлением индуктивности по первой зависимости достигается существенное улучшение формы входного тока только при отстающих углах управления и, например, при максимальной величине  $\omega L/R = 5$  в диапазоне регулирования  $I : 5$ . При опережающих углах управления необходимо перейти к регулированию индуктивности по второй зависимости. Хотя в последнем случае требуемое максимальное значение индуктивности в  $(\kappa + 1)$  раз больше, чем при первой зависимости, синусоидальная форма входного тока обеспечивается как при отстающих, так и при опережающих углах управления.

При идеальном фазовом регулировании трехфазного напряжения в

установившемся режиме трехфазный регулирующий орган в целом не обменивает энергию ни с источником питания, ни с нагрузкой, хотя в каждой фазе регулирующего органа происходит периодическое потребление и выдача энергии с удвоенной частотой питания, как это было в однофазных схемах. Если конфигурация цепи допускает межфазный энергообмен, то применение энергонакопительных элементов не является неизбежным. Целенаправленное управление межфазным энергообменом можно осуществить с помощью управляемых межфазных автотрансформаторов (рис. 2 и 3). При симметричной системе синусоидальных входных напряжений количество витков межфазного трансформатора должно изменяться также по синусоидальным функциям, чтобы получить синусоидальные входные токи. Типовая относительная мощность трехобмоточного и однообмоточного межфазных автотрансформаторов составляет 0,744 и 0,249, соответственно.

Известно, что применение параметрических реактивных накопителей энергии позволяет повысить эффективность силовых сглаживающих фильтров выпрямленного тока. Показано, что при заданной индуктивности сглаживающего дросселя индуктивного и индуктивно-емкостного фильтров полное сглаживание тока ограничено не дефицитом энергии в сглаживающем дросселе, а неполным использованием этой энергии. Накопленную в сглаживающем дросселе энергию возможно изменять целенаправленным изменением количества витков обмотки сглаживающего дросселя или шунтированием обмотки дросселя управляемым сопротивлением. Накопленная в сглаживающем дросселе энергия наилучше использована, когда индуктивность дросселя изменяется от ее максимального значения до нуля и вся переменная составляющая входного напряжения падает на сглаживающий дроссель. Например, когда входное напряжение индуктивного фильтра  $u = U_0 + U_m \sin \omega t$ , для полного сглаживания тока ( $\kappa_\phi = \infty$ ) нагрузки  $R$  индуктивности дросселя должна изменяться по закономерности

$$L = \frac{2R}{\omega} \frac{U_m}{U_0} (1 - \cos \omega t), \text{ откуда } L_{\min} = 0 \text{ и } L_{\max} = \frac{4R}{\omega} \frac{U_m}{U_0}.$$

Для сравнения приведен коэффициент фильтрации простого индуктивного фильтра при  $L = L_{\max} = \text{const}$  и  $U_m = U_0 : \kappa_\phi = \sqrt{1 + \left(\frac{\omega L_{\max}}{R}\right)^2} = \sqrt{17}$ . При регулировании накопленной в сглаживающем дросселе энергии целенаправленным управлением диссипативного элемента, подключенного параллельно сглаживающему дросселю (рис. 4), полная сглаженность тока нагрузки  $i_d$  достигается при изменении сопротивле-

ния регулирующего элемента  $R_2$  по закономерности

$$R_2 = \frac{U_{01} + U_m \sin \omega t}{U_m} \cdot \frac{1}{\sqrt{R_1^2 + (\omega L)^2}} \sin(\omega t - \varphi)$$

При  $U_m/U_0 = 0,1$  и  $\omega L/R_1 = 10$  коэффициент простого индуктивного фильтра, имеющего те же самые значения к.п.д. и индуктивности дросселя, только 1,49.

Во второй главе приведен обзор разработанных с участием автора многопульсных регуляторов переменного и выпрямленного напряжений и определены их основные расчетные параметры, необходимые для проектирования конкретных устройств. Для наиболее перспективных схем найдены аналитические выражения, описывающие характер изменения потребляемого из сети тока при разных состояниях тиристорного коммутатора, и на основе их проанализирован гармонический состав потребляемого из сети тока при разных углах управления и при разной постоянной времени силовой цепи.

Определено влияние конечной величины индуктивности сглаживающего дросселя на коэффициент гармоник и действующее значение выходного напряжения однофазного индуктивно-тиристорного регулятора тока (рис. 1, где  $n = 3$ ) в режимах принудительной и естественной коммутации тиристоров. Показано, что при заданном максимально допустимом коэффициенте гармоник выходного напряжения диапазон регулирования выходного напряжения уменьшается с уменьшением постоянной времени последовательной цепи из дросселя и нагрузки независимо от способа коммутации тиристоров. При этом минимальный коэффициент гармоник соответствует максимальному выходному напряжению.

Основные расчетные параметры новых схем (всего 18 схем) фазового регулирования трехфазного переменного напряжения, построенных на базе межфазных трансформаторов, рассчитаны при активной нагрузке и при симметричной трехфазной системе питания  $u_A = U_m \sin \omega t$ . Для формирования малоискаженных кривых токов питания и напряжений нагрузки сперва формируется достаточно густая сетка синусоидальных кривых напряжений:

$$u_h = U_m \sin \frac{\pi}{m} (2h-1) \cos \left[ \frac{\pi}{m} (2h-1) - \omega t \right]$$

$$u_h = U_m \sin \frac{2\pi}{m} h \cos \left( \frac{2h}{m} h - \omega t \right),$$

где  $h = 1, 2, \dots, m/2$ ,  $m$  — пульсность схемы (в данной работе ограничивается  $m = 12$ ). Из отрезков первого множества синусоидальных кривых формируется кривая напряжения нагрузки без нулевой степени (рис. 5,а) и из отрезков второго множества синусоидальных кривых — с нулевой степенью (рис. 5,б). Последнюю форму кривой напряжения нагрузки (при активной нагрузке также кривой тока) имеет схема рис. 6. Относительная типовая мощность трехфазного автотрансформатора Т равна 0,252. Процесс работы двенадцатипульсных схем регулирования трехфазного напряжения при индуктивной и активно-индуктивной нагрузке проанализирован также по примеру схемы рис. 6. По результатам анализа можно заключить, что предложенные преобразователи обеспечивают хороший спектральный состав тока нагрузки как при активной, так и при активно-индуктивной нагрузке (рис. 5,в), при этом с увеличением постоянной времени нагрузки форма тока улучшается. Ток нагрузки имеет свое максимальное значение и синусоидальную форму при угле управления, равном фазному сдвигу нагрузки  $\varphi$ , и ток нагрузки уменьшается до нуля при угле управления, равном  $2\pi/3$ .

Рассмотрена возможность увеличения пульсности условно-многофазных схем, содержащих два  $m_1$ -фазных выпрямительных блока и уравнительный реактор с  $m_2$  промежуточными отводами. Показано, что  $m = 2m_1m_2$ -пульсный режим достигается использованием  $2m_1 + m_2$  тиристоров. Например, в схеме рис. 7 двенадцатипульсный режим достигается использованием 7 тиристоров, при этом относительная типовая мощность трансформатора Т1 равна 0,72 и уравнительного реактора Т2 — 0,29.

В конце этой главы рассмотрены вопросы построения многопульсных выпрямителей на базе межфазных трансформаторов. Приведены основные расчетные параметры выпрямительного и межфазного трансформатора, тиристорного коммутатора и выпрямительного моста. В первой группе выпрямителей регулируется переменное напряжение неуправляемого выпрямительного моста, поэтому они входят в класс выпрямителей, регулируемых тиристорами на стороне переменного тока. Из рассмотренных двенадцатипульсных выпрямителей первой группы относительная типовая мощность межфазного автотрансформатора не превышает 0,25. Во второй группе выпрямителей выпрямленное напряжение регулируется изменением интервалов проводимости тиристо-

ров выпрямительного моста, а однообмоточный межфазный автотрансформатор используется для распределения тока между фазами питающей сети. Показано, что для устранения высших гармоник ниже 11-й во входных токах и ниже 12-й в выходном напряжении двенадцатипульсного выпрямителя, отношение чисел витков секций обмотки межфазного автотрансформатора должно равняться  $I : 2,73$ . Более чем десятикратное уменьшение 5-й и 7-й гармоник тока питания, по сравнению с шестипульсной схемой, достигается при отношении чисел витков  $2,4I \dots 3,12$ . Однообмоточный межфазный автотрансформатор может работать в качестве согласующего повышающего автотрансформатора и в зависимости от конкретной схемы соединения выводов его обмотки номинальное выходное напряжение может быть увеличено в  $I,36$  или в  $3,73$  раза. Тогда среднее значение номинального напряжения нагрузки равняется  $I,2I$ - или  $3,3I$ -кратному амплитудному значению линейного напряжения питания, соответственно, но при этом относительная расчетная мощность межфазного автотрансформатора увеличивается с  $0,235$  до  $0,320$  и  $0,873$ , соответственно.

В третьей главе рассматриваются характеристики оригинальных сглаживающих фильтров выпрямленного напряжения. По принципу работы эти фильтры разделяются на две группы: 1) индуктивный или индуктивно-емкостный фильтр со ступенчато изменяемым числом витков дросселя (рис. 8); 2) к обмотке или ее секции подключен параллельно транзисторный фильтр непрерывного действия (рис. 10). По проведенному анализу видно, что первая схема позволяет скомпенсировать самые низкие из высших гармоник тока нагрузки (рис. 9). Положительный эффект достигается в широком диапазоне изменения переменной составляющей входного напряжения:  $0,5 \dots 2,0 U_{\text{ном}}$ . Экспериментально проверено уменьшение разности максимального и минимального значений тока нагрузки в  $4,6$  раз, по сравнению с классическим LC-фильтром, и действующего значения основной гармонической составляющей пульсации в  $36$  раз. По экспериментальным результатам проверена действительность математической модели параметрических реактивных элементов, управляемых сигналом источника управления.

Когда в шунтирующую ветвь входит вся обмотка сглаживающего дросселя (рис. 10), т.е.  $w_1 = 0$ , тогда средняя мощность на регулирующем транзисторе выражается

$$P_{TV} = \frac{k_m(k_0 - 0,5k_m)}{k_m + k_0 \sqrt{1 + (\omega t)^2}} \cdot U_0 I_0,$$

где  $\kappa_m = U_m / U_0$ ;  $\kappa_0 = \Delta U_0 / U_0$  - относительное падение постоянного напряжения на фильтре;  $\tau = L_0 / R_0$  - постоянная времени шунтирующей ветви. Анализ схемы показывает, что с целью максимальной разгрузки регулирующего транзистора по току и уменьшения рассеиваемой в нем мощности целесообразно включить в шунтирующую ветвь всю обмотку. Если включить в шунтирующую ветвь только часть витков, возможно повысить к.п.д. фильтра

$$\eta = 1 - \frac{U_{кз\text{ мин}}}{U_0} - \frac{\kappa_u U_m}{U_0} \quad \text{где} \quad \kappa_u = \sqrt{\frac{1 + \kappa^4 (\omega\tau)^2}{1 + \kappa^2 (\omega\tau)^2}}, \quad \kappa = \frac{w_2}{w_1 + w_2}$$

(зависимости  $\kappa_u = f(\kappa)$  при  $\omega\tau = var$  приведены на рис. II). Когда отвод обмотки сделан от части витков, обеспечивающей минимальное значение  $\kappa_u$ , к.п.д. фильтра повышается при относительной входной пульсации  $U_m / U_0 = 0,25$  от 0,75 до 0,89...0,97 в зависимости от постоянной времени шунтирующей ветви. При этом рассеиваемая на транзисторе мощность равна 1,4...3,8 % от входной мощности фильтра.

Зависимости коэффициента фильтрации по напряжению приведены на рис. 12, где кривая 1 соответствует  $L_0 R_0$ -индуктивному фильтру, 2 - транзисторному фильтру с чисто омической шунтирующей ветвью, 3 - транзисторному фильтру с  $L_0 R_0$ -шунтирующей ветвью и 4 - транзисторному фильтру без шунтирующей ветви. Включение в шунтирующую ветвь индуктивности позволяет повысить коэффициент фильтрации на 40 дБ, что показывает зависимость коэффициента фильтрации по напряжению от параметров шунтирующей ветви. Предложена система управления регулирующим транзистором, где последняя зависимость устранена.

В приложениях приведены технические данные внедренных устройств и акты сдачи-приемки.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с поставленной целью в диссертации получены следующие основные результаты:

1. Показано, что перспективным путем решения проблемы ЭМС регуляторов переменного и выпрямленного напряжения с сетью питания и нагрузкой является построение малоискажающих вентильно-трансформаторных преобразователей и силовых сглаживающих фильтров вы-

прямоугольного напряжения на базе управляемых реактивных энергоаккумулятивных элементов или на базе управляемого межфазного трансформатора, обеспечивающих целенаправленный энергообмен.

2. Предложена и исследована оригинальная схема однофазного тиристорно-индуктивного регулятора переменного напряжения, содержащего сглаживающий дроссель с переключаемым количеством витков, и определена закономерность изменения индуктивности этого дросселя. При выполнении обмотки с двумя промежуточными отводами и при заданном максимально допустимом коэффициенте гармоник кратность регулирования выходного напряжения уменьшается при уменьшении постоянной времени силовой цепи. Однако максимальному выходному напряжению соответствует минимальный коэффициент гармоник тока нагрузки и максимальный коэффициент гармоник соответствует малым значениям выходного напряжения.

3. Предложены и исследованы 17 оригинальных схем для регулирования трехфазного напряжения, содержащих управляемый межфазный трансформатор. Определены закономерности изменения числа витков фазных обмоток межфазного трансформатора и алгоритмы управления тиристорным коммутатором. Приведенные в таблицах основные расчетные характеристики предложенных малоискажающих преобразователей позволяют выбрать наиболее перспективные схемы и рассчитать межфазный трансформатор и тиристорный коммутатор по заданным исходным данным. В предложенных схемах минимальная относительная типовая мощность межфазного трансформатора и условная мощность тиристорного коммутатора составляет 0,109 и 1,01, соответственно. Показано, что хороший спектральный состав тока нагрузки имеется как при активной, так и при активно-индуктивной и индуктивной нагрузке, при этом с увеличением постоянной времени нагрузки форма тока нагрузки улучшается.

4. Предложен способ улучшения спектрального состава входного тока условно-многофазных схем выпрямителей и регуляторов трехфазного напряжения на их базе. В предложенных двухкаскадных устройствах для регулирования трехфазного напряжения, содержащих два  $m_1$  фазных выпрямительных блока и уравнивающий реактор с  $m_2$  промежуточными отводами,  $2m_1m_2$ -пульсный режим достигается применением  $2m_1 + m_2$  тиристоров.

5. Проведен анализ оригинальных схем двенадцатипульсных выпрямителей. Даны основные соотношения для расчета указанных выпря-

мителей и определена зависимость гармонического состава входного тока от отношения чисел витков секций обмотки межфазного трансформатора.

6. Исследованы оригинальные схемы сглаживающих фильтров с импульсно-управляемым реактивным элементом. Показано, что в импульсно-управляемом индуктивном и индуктивно-емкостном сглаживающем фильтре с двумя промежуточными отводами обмотки дросселя первая гармоника пульсации тока нагрузки уменьшается более чем на порядок, по сравнению с фильтрами, содержащими неуправляемые дроссели.

7. Показано, что если последовательный транзисторный фильтр непрерывного действия шунтирован резистивно-индуктивной шунтирующей ветвью с угловой постоянной времени  $10 \dots 20$ , мощность регулирующего транзистора уменьшается в  $5 \dots 10$  раз и коэффициент фильтрации увеличивается на  $10 \dots 40$  дБ, по сравнению с фильтрами с чисто омической шунтирующей ветвью.

Установлено, что для повышения к.п.д. последовательного транзисторного фильтра обмотку сглаживающего дросселя шунтирующей ветви необходимо подключить по автотрансформаторному соединению.

8. По результатам теоретических исследований разработаны и внедрены три преобразователя переменного напряжения в постоянное и один симметрирующий источник питания однофазной нагрузки из трехфазной сети.

#### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. А.с. 777782 (СССР). Фильтр для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения / В.В.Сарв, Ю.Э.Сооярв. - Оpubл. в Б.И., 1980, № 41.

2. А.с. 857948 (СССР). Устройство для регулирования переменного напряжения / В.В.Сарв, Ю.Э.Сооярв. - Оpubл. в Б.И., 1981, № 31.

3. А.с. 936277 (СССР). Фильтр / И.Э.Ранне, В.В.Сарв, Ю.Э.Сооярв. - Оpubл. в Б.И., 1982, № 22.

4. А.с. 1012404 (СССР). Фильтр / Ю.Э.Сооярв, В.В.Сарв, П.И.Тамкиви, И.Э.Ранне. - Оpubл. в Б.И., 1983, № 14.

5. А.с. 1015357 (СССР). Устройство для регулирования трехфазного напряжения / Т.Ю.Саккос, И.Э.Ранне, В.В.Сарв, Ю.Э.Сооярв. -

Опубл. в Б.И., 1983, № 16.

6. А.с. I094I23 (СССР). Трехфазный преобразователь переменного напряжения в постоянное / И.Э.Ранне, Т.Ю.Саккос, Ю.Э.Сооярв и др. - Опубл. в Б.И., 1984, № 19.

7. А.с. II75010 (СССР). Преобразователь переменного трехфазного напряжения в трехфазное переменное / Т.Ю.Саккос, Х.А.Саккос, Ю.Э.Сооярв и др. - Опубл. в Б.И., 1985, № 31.

8. Каазик В., Сооярв Ю. Характеристики тиристорно-индуктивного регулятора переменного напряжения при естественной коммутации / Изв. АН ЭССР: Физ. Матем. - 1979. - № 4. - С. 352-357.

9. Каазик В.Т., Сооярв Ю.Э. Характеристики тиристорно-индуктивного регулятора переменного напряжения при принудительной коммутации // Теоретическая электротехника. - Львов: Вища школа: Изд-во при Львов. ун-те, 1980. - Вып. 28. - С. 87-96.

10. Оявээр М., Сооярв Ю. Анализ процессов преобразования энергии в индуктивно-ключевом сглаживающем фильтре. - Изв. АН ЭССР, Физ. Матем., 1983. - № 1. - С. 61-65.

11. Принципы построения малоискажающих вентильных преобразователей на базе управляемого межфазного трансформатора / В.В.Сарв, Ю.Э.Сооярв, П.И.Тамкиви, А.М.Туйск // Электротехника. - 1989. - С. 17-20.

12. Саккос Т.Ю., Сооярв Ю.Э. Тиристорно-индуктивный регулятор переменного напряжения // Проблемы преобразовательной техники. - Киев: ИЭД АН УССР, 1979. - Ч. I. - С. 62-65.

13. Сарв В.В., Сооярв Ю.Э., Тамкиви П.И., Туйск А.М. К вопросу синтеза линейных импульсно-управляемых реактивных двух- и многополюсников. - Тез. докладов и сообщений I Всесоюзн. конф. по теоретической электротехнике. - Ташкент, 1987. - С. 154-155.

14. Сооярв Ю.Э. Сглаживающий LC-фильтр с регулируемой индуктивностью дросселя // Уменьшение искажений в цепях с силовыми полупроводниковыми преобразователями. - Таллин: АН ЭССР, 1981. - С. 16-19.

15. Сооярв Ю.Э. Сглаживание выпрямленного напряжения с умножением частоты пульсации // Тиристорно-индуктивные комплексы звуковой и ультразвуковой частоты. - Уфа: УАН им. Орджоникидзе, 1982. - С. 158-159.

16. Сооярв Ю.Э. Транзисторный фильтр с активно-индуктивной буферной ветвью // Проблемы электромагнитной совместимости силовых полупроводниковых преобразователей: Тез. докл. II межведомственного научно-техн. совещания. - Таллин, 1982. - С. 235-236.

17. Сооярв Д.Э. Качественные показатели транзисторного фильтра с активно-индуктивной буферной ветвью // Проблемы преобразовательной техники: Тез. докл. - Киев, 1983. - Ч. 3. - С. 139-141.

18. Сооярв Д.Э. Электромагнитные процессы в многопульсных регуляторах переменного напряжения при индуктивной нагрузке // Проблемы электромагнитной совместимости силовых полупроводниковых преобразователей. - Таллин: АН ЭССР. - 1986. - Ч. I. - С. 85-86.

19. Сооярв Д.Э. Определение основных характеристик регулятора трехфазного напряжения с межфазным автотрансформатором // Проблемы преобразовательной техники. - Киев: ИЭД АН УССР. - 1987. - Ч. I. - С. 225-227.

20. Сооярв Д.Э. Характеристики I2-пульсного регулятора трехфазного напряжения при активно-индуктивной нагрузке // Изв. АН ЭССР: Физ. Матем. - 1988. - Т. 37, № 3. - С. 315-321.

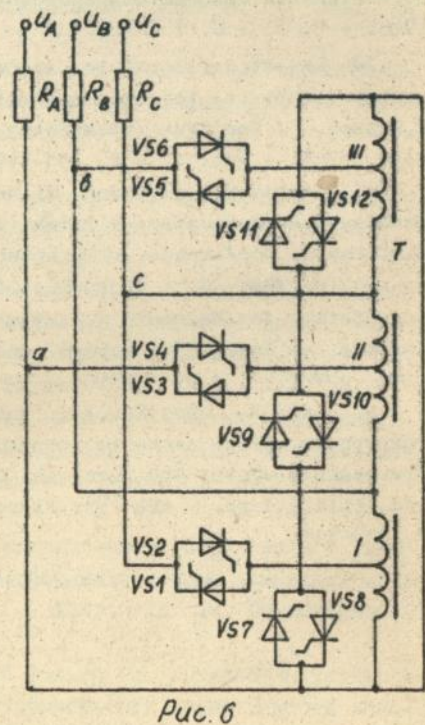
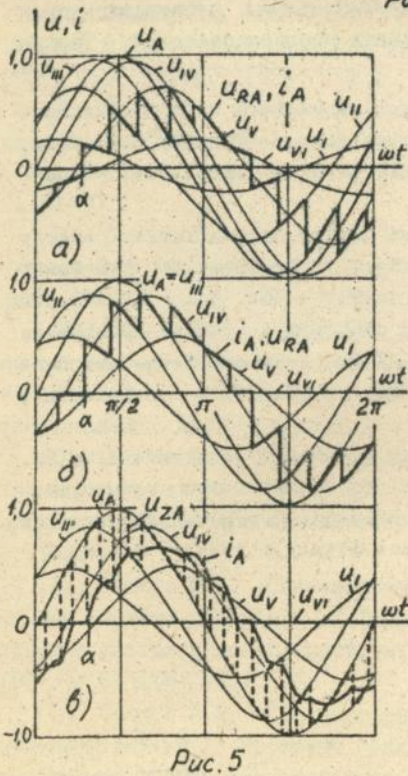
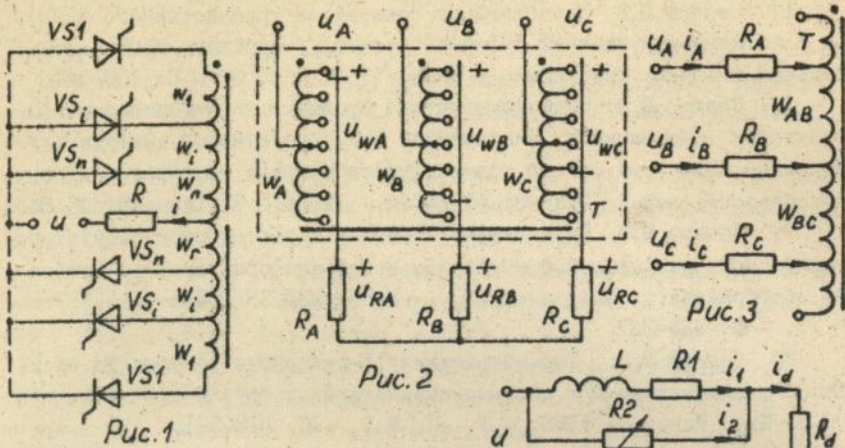
21. Туйск А.М., Сооярв Д.Э. Сглаживающие фильтры с импульсно-управляемыми реактивными элементами // Проблемы электромагнитной совместимости силовых полупроводниковых преобразователей. - Таллин: 1986. - Ч. I. - С. 137-138.

22. Latest developments in power converters with interphase energy exchange for harmonic elimination / V.Sarv, M.Ojaveer, T.Sakkos, J.Soojärv // 5th Power Electronics Conference. - Budapest, 1985. - Vol. 3. - P. 331-340.

23. Improved smoothing filters with controllable energy exchange / J.Soojärv, A.Tuisk, V.Sarv, P.Tamkivi // 5th Power Electronics Conference. - Budapest, 1985. - Vol. 3. - P. 49-57.

24. Soojärv, J. A threephase AC controller with an interphase transformer for harmonic reduction // Proceedings of the 6th Conference on Power Electronics and Motion Control. - Budapest, 1990. - Vol. 3. - P. 957-960.

25. Sarv V., Soojärv J., Tuisk A. Power converters using interphase energy exchange control for distortion reduction / Proceedings of the 4th European Conference on Power Electronics and Applications. - EPE '91: Florence (Italy): 1991. - Vol. 1. - P. 310-315.



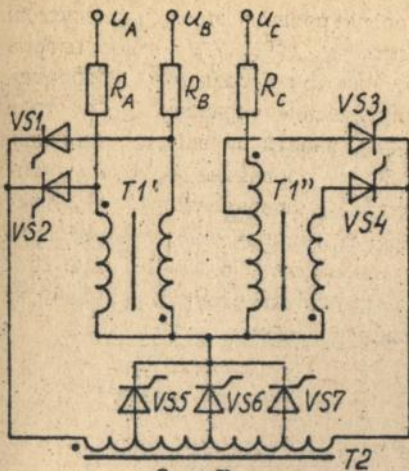


Рис. 7

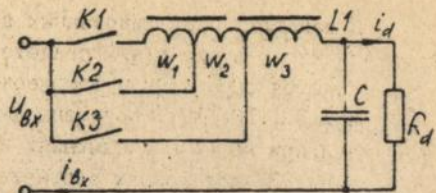


Рис. 8

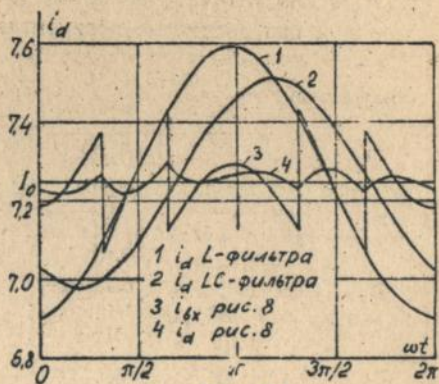


Рис. 9

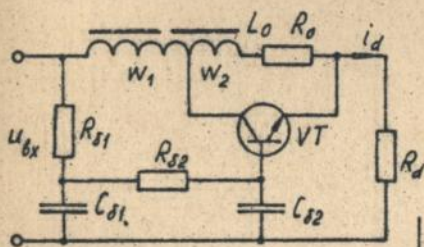


Рис. 10

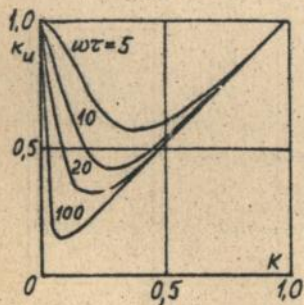


Рис. 11

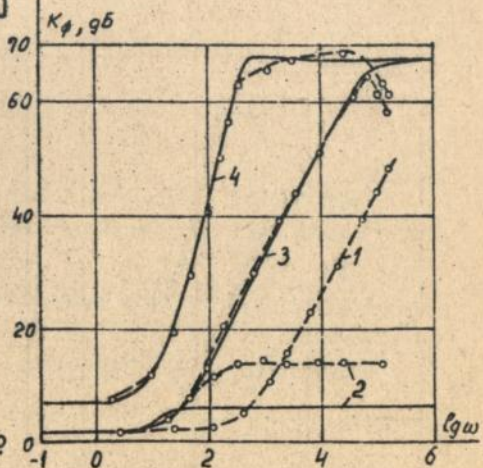
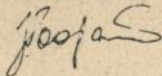


Рис. 12

В работах, опубликованных в изобретениях, авторские свидетельствах принадлежит: в авторских свидетельствах / 1...7 / вклад автора определяется справками о творческом участии в создании изобретений; в / 8...10, 12 / получены аналитические выражения для тока нагрузки при конечных значениях индуктивности дросселя, проведен анализ на ЭВМ полученных соотношений и проведена их экспериментальная проверка; в / 13 / подтверждена экспериментально действительность математической модели параметрических индуктивных двухполюсников, управляемых сигналом управления; в / 21...23, 25 / разработаны математические модели исследуемых схем, проведен их анализ и разработка экспериментальных устройств.

Соискатель



Подписано к печати 23.II.93г. Формат 60x84/16

Бумага офсетная Усл.-печ.лист. Уч.-изд.лист

Тираж 100 Заказ № 41 Бесплатно

Участок оперативной печати Института проблем энергосбережения

254070, Киев, ул. Покровская, 11