

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ  
ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

На правах рукописи

КОЗЛОВ Юрий Валентинович

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ  
В ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ С ПРИНУДИТЕЛЬНЫМ ФОРМИРОВАНИЕМ  
КРИВОЙ ПОТРЕБЛЯЕМОГО ТОКА

Специальность 05.09.12 – Полупроводниковые преобразователи  
электроэнергии

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Киев 1994



Диссертацией является рукопись  
Работа выполнена в Институте электродинамики  
НАН Украины, г. Киев

Научный руководитель - доктор технических наук,  
профессор, академик НАН Украины  
А. К. Шидловский

Официальные оппоненты - доктор технических наук,  
Николай Николаевич Юрченко  
кандидат технических наук,  
Николай Борисович Марченко

Ведущая организация - НИИ "Квант", г. Киев  
Министерство машиностроения ВПК  
и конверсии Украины

Защита диссертации состоится 6 июля 1994 года в II час. на  
заседании специализированного ученого совета Д 016.30.03 при  
Институте электродинамики НАН Украины по адресу  
252680, г. Киев-57, проспект Победы, 56, тел. 446-91-15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института  
электродинамики НАН Украины

Автореферат разослан 3 июня 1994 г.

ЛННБ ім. В. Стефаніка  
АН України

Ученый секретарь \_\_\_\_\_  
специализированного ученого совета,  
доктор технических наук

В. С. Федий

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Широкая электронизация народного хозяйства привела к значительному расширению областей практического применения электронной и вычислительной техники. С позиций электротехники данные устройства по отношению к сети переменного тока являются комплексными нелинейными нагрузками и их массовое использование в низковольтных сетях общего назначения обостряет проблему электромагнитной совместимости (ЭМС). Нелинейный характер нагрузки вызывает генерирование в питающую сеть широкого спектра высших гармоник, что оказывает отрицательное влияние на параметры качества электроэнергии.

Указанная проблема привела к интенсивному поиску новых, более совершенных технологий преобразования параметров электрической энергии, обеспечивающих снижение вредных воздействий электропотребителей на питающие сети. Одним из наиболее перспективных направлений, решающих данную проблему, является создание специальных транзисторных следящих систем с высокочастотным импульсным регулированием, обладающих улучшенной ЭМС с питающей сетью.

Данный принцип используется при построении стабилизированных выпрямителей с принудительным формированием кривой потребляемого тока, следящих транзисторных инверторов, активных фильтров высших гармоник, преобразователей частоты со звеном постоянного тока, сетевых кондиционеров мощности, агрегатов бесперебойного электропитания. Кроме того, на основе следящих транзисторных систем возможно создание универсальных преобразователей, осуществляющих любой требуемый вид функционального преобразования параметров электроэнергии при минимальных аппаратурных издержках.

Вместе с тем, схемные решения и конструктивные особенности, их многообразие не позволяют однозначно найти наилучшее решение для конкретной технической задачи. Интенсивное развитие данной техники и ее расширенное использование привели к разрыву между теоретической основой их проектирования и практической потребностью.

Проектирование высокочастотных транзисторных преобразователей базируется на знании электромагнитных процессов, однако они в настоящее время изучены недостаточно. Исследование существующих и новых структур преобразователей данного типа, анализ протекающих электромагнитных процессов позволят за счет оптимизации параметров элементов и алгоритмов их функционирования обеспечить ЭМС с питаю-

шей сетью и потребителями, улучшить качество электроэнергии во входных и выходных цепях устройств преобразовательной техники.

Целью диссертационной работы является разработка обобщенных методик моделирования и анализа электромагнитных процессов в преобразователях с принудительным формированием кривой потребляемого тока с учетом переменной структуры и недетерминированности моментов коммутации; разработка и исследование новых типов импульсных регуляторов, позволяющих создавать многофункциональные преобразователи, обеспечивающие двусторонний обмен энергией между первичным источником и нагрузкой при высокой ЭМС.

Поставленная цель потребовала решения следующих задач:

- развитие методик моделирования и анализа электромагнитных процессов в преобразователях переменной структуры и недетерминированными моментами коммутации;
- разработка математического и программного обеспечения для гармонического анализа кривой потребляемого тока;
- развитие схемотехники многофункциональных полупроводниковых преобразователей, обладающих высокой ЭМС как с питающей сетью, так и с нагрузкой и инвариантных к направлению передачи электроэнергии;
- анализ и оптимизация алгоритмов управления, структуры и параметров цепи обратной связи для обеспечения оптимальных характеристик преобразователя.

Методы исследования. При решении поставленных задач использованы положения теории электрических цепей, операции логического исчисления, основы гармонического анализа, численные методы решения дифференциальных уравнений, методы анализа электронных схем, методы математического моделирования с использованием ЭВМ. Достоверность теоретических положений подтверждена экспериментальными исследованиями.

Научная новизна. В диссертационной работе впервые:

- установлено, что использование мостовых схем с ключами переменного тока позволяет осуществить все возможные виды функционального преобразования параметров электроэнергии, обеспечивает инвариантность преобразователя к направлению передачи электроэнергии и его ЭМС с источником питания и нагрузкой;
- проведен анализ составляющих погрешности точной и приближенной методик моделирования и показано, что определяющим фактором в величине погрешности является точность вычисления длительности интервалов постоянств структуры, которая зависит от шага дискрети-

зации временных интервалов и является одинаковой для точной и приближенной моделей;

- в результате моделирования установлено, что возможность оперативного управления скоростью изменения тока входного дросселя, характерная для предложенной схемы силовой части преобразователя, позволяет в 5-8 раз уменьшить частоту работы переключающих элементов при сохранении требуемого коэффициента гармоник потребляемого тока;

- показано, что для минимизации искажений потребляемого тока коррекцию сигнала обратной связи по выходному напряжению целесообразно осуществлять на основе дискретных систем с синхронизацией по входному напряжению.

**Практическая ценность.** В результате проведенных исследований разработаны методики анализа электромагнитных процессов в преобразователях с принудительным формированием кривой потребляемого тока, позволяющие при приемлемой точности существенно упростить описание математической модели преобразователей. Предложены два схемных решения, защищенные авторскими свидетельствами, которые позволили разработать принципиальную схему силовой части и основных функциональных узлов системы управления и реализовать универсальный статический преобразователь (УСП) на практике. Получены расчетные зависимости, позволившие выработать практические рекомендации по выбору параметров элементов УСП, исходя из требуемого коэффициента гармоник кривой потребляемого тока при минимальной частоте коммутации переключающих элементов;

**Автор защищает следующие положения:**

- приближенную методику моделирования электромагнитных процессов в следящих импульсных преобразователях с переменной структурой и недетерминированными моментами коммутации;

- математическую модель и результаты анализа электромагнитных процессов, протекающих в преобразователях с принудительным формированием кривой потребляемого тока;

- методику и результаты гармонического анализа кривой потребляемого тока;

- структуры силовой части и системы управления универсального статического преобразователя реализующего любой требуемый вид функционального преобразования параметров электроэнергии при высокой ЭМС с первичным источником питания и нагрузкой.

**Реализация результатов работы в промышленности.** Результаты диссертационной работы использованы при разработке систем вторич-

ного электропитания с улучшенной ЭМС в составе аппаратуры отображения информации, создаваемой в СКБ "Ритм" (г.Київ); при разработке агрегатов бесперебойного электропитания для средств вычислительной техники в ПО "Электрочмаш" (г.Київ); при разработке систем вторичного электропитания судовых радиоэлектронных комплексов в НИИ "Квант" (г.Київ).

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались автором и обсуждались на:

семинаре "Проблемы качества электроэнергии и электромагнитная совместимость в системах вторичного электропитания", г.Москва, 1988г;

семинаре "Импульсные источники вторичного электропитания. Состояние и перспективы развития", г. Севастополь, 1989 г.;

I Всесоюзной научно-технической конференции "Силовые электронные системы и устройства маломощной преобразовательной техники", г.Алма-Ата, 1990 г.;

V Всесоюзной научно-технической конференции "Проблемы преобразовательной техники", г.Чернигов, 1991 г.;

II научно-технической конференции "Электромагнитная совместимость технических средств", г.Санкт-Петербург, 1992 г.

Публикации. Основное содержание диссертации отражено в 12 печатных работах, в том числе двух препринтах, двух статьях, двух авторских свидетельствах на изобретения.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, списка литературы и приложения. Содержит 100 страниц основного машинописного текста, 69 рисунков на 27 страницах, 7 таблиц, список литературных источников из 88 наименований на 9 страницах и 28 страниц приложения.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследований. Изложены основные научные и практические результаты, полученные в работе, а также основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена анализу современного состояния развития устройств преобразовательной техники с высокочастотным импульсным принципом регулирования. Показано, что с помощью данных устройств возможна реализация всех основных видов функционального преобразования параметров электроэнергии при обеспечении ЭМС с питающей сетью. Вместе с тем, существует ряд задач, например электропривода переменного тока ветроэнергетики и др., требующих создания преоб-

разователей частоты, обладающих двунаправленным обменом энергии между питающей сетью и нагрузкой. В этой связи представляет интерес создание преобразователей, обладающих расширенными функциональными возможностями. Приведен краткий обзор существующей схемотехники многофункциональных преобразователей и сформулированы основные требования, предъявляемые к ним:

- минимизация активных потерь;
- отсутствие элементов, работающих на частоте питающей сети;
- симметрия схемы относительно входа и выхода;
- наличие промежуточного накопителя электроэнергии.

Первое из требований необходимо для достижения высокого КПД преобразователя; второе - для обеспечения хороших массогабаритных показателей; третье - для осуществления двустороннего обмена энергией между входом и выходом; четвертое - обусловлено необходимостью обеспечения ЭМС преобразователя с питающей сетью и нагрузкой.

На рис. I показана схема универсального статического преобразователя (УСП), удовлетворяющая предъявленным требованиям. Данный преобразователь представляет собой замкнутую систему автоматического регулирования с релейным несинхронизированным способом управления, управляющими координатами которой являются входной ток и выходное напряжение. Основу силовой части (СЧ) УСП составляют дроссели  $L_1$  и  $L_2$ , накопительный конденсатор  $C$ , а также восемь полностью управляемых ключей переменного тока  $K_1 - K_8$ .

В зависимости от топологии электрической цепи, определяемой текущим состоянием ключей переменного тока напряжение на дросселях  $L_1$  и  $L_2$  принимает различные значения:

$$u_{L_1}(t) = \begin{cases} u_1(t), & \text{при } \varphi_1\varphi_3=1 \text{ или } \varphi_2\varphi_4=1; \\ u_1(t) - u_c(t), & \text{при } \varphi_2\varphi_3=1; \\ u_1(t) + u_c(t), & \text{при } \varphi_1\varphi_4=1; \end{cases} \quad (1)$$

$$u_{L_2}(t) = \begin{cases} -u_2(t), & \text{при } \varphi_5\varphi_7=1 \text{ или } \varphi_6\varphi_8=1; \\ u_c(t) - u_2(t), & \text{при } \varphi_5\varphi_8=1; \\ -u_c(t) - u_2(t), & \text{при } \varphi_6\varphi_7=1. \end{cases} \quad (2)$$

где  $\varphi_i$  - логический сигнал управления  $i$ -м ключом, истинное значение которого соответствует проводящему состоянию ключа.

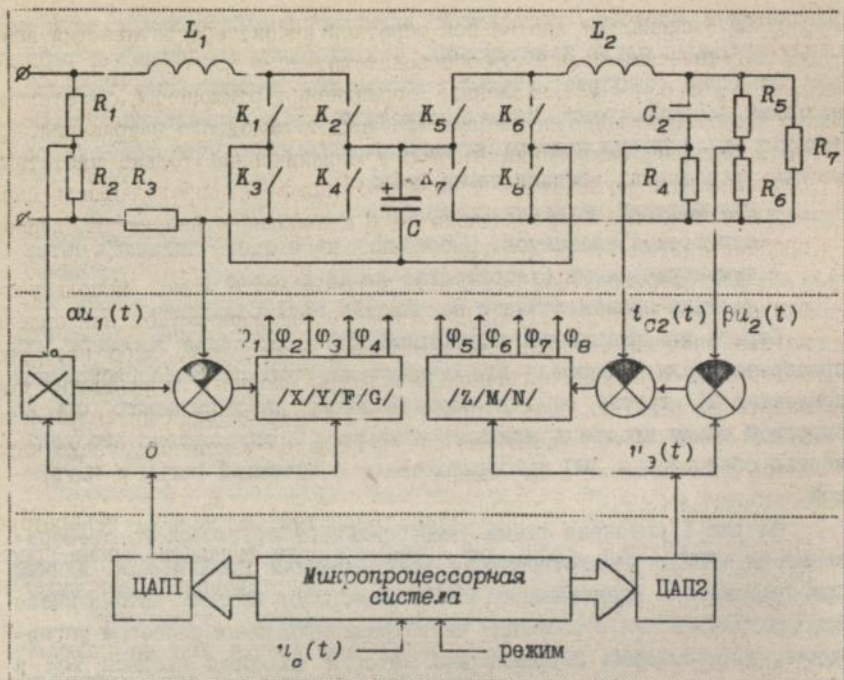


Рис. I Структурная схема универсального статического преобразователя.

При условии, что напряжение накопительного конденсатора  $u_0(t)$  поддерживается на уровне, превышающем амплитудные значения входного и выходного напряжений, из (1) и (2) следует, что  $u_{L1}(t)$  и  $u_{L2}(t)$  могут быть как положительными, так и отрицательными. Это позволяет осуществить управление работой УСП по мгновенным значениям входного тока и выходного напряжения, обеспечивая требуемую величину их отклонений относительно эталонных значений

$$\begin{cases} \Delta u_1(t) = \alpha u_1(t) - i_1(t)R_{ш} < \delta_u \\ \Delta u_2(t) = u_0(t) - \beta u_2(t) - i_{C2}(t)T_3 < \delta_u \end{cases} \quad (3)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  — коэффициенты входного и выходного резистивных делителей соответственно;

$\delta$  - сигнал отрицательной обратной связи, обеспечивающий энергетический баланс преобразователя;

$\delta_i$  и  $\delta_u$  - установленные ограничения отклонений от эталонов соответственно потребляемого тока и выходного напряжения.

Величины отклонений  $\delta_i$  и  $\delta_u$ , ограниченные только частотными свойствами переключающих элементов, являются определяющими параметрами качества потребляемого тока и выходного напряжения данного преобразователя.

Для формирования эталона потребляемого тока используется входное напряжение  $U_1(t)$ . При этом, в зависимости от направления потока энергии (от источника питания в нагрузку, либо наоборот) полярность эталонного сигнала в контуре входного тока должна совпадать по фазе или быть в противофазе с напряжением питающей сети. Это свойство преобразователя обеспечивается изменением знака параметра  $\delta$ , входящего в выражение (3).

Эталон выходного напряжения задается автономным генератором сигнала требуемой формы, зависящей от вида функционального преобразования параметров электроэнергии (инвертирование, выпрямление, преобразование частоты).

Для подтверждения возможности реализации УСП на практике в данной главе рассмотрены особенности построения его системы автоматического управления, которая выполняет следующие функции:

- формирование эталона выходного напряжения;
- формирование сигналов  $\varphi_1 - \varphi_2$ , обеспечивающих получение выходного напряжения  $u_2(t)$  требуемой величины и формы, а также потребляемого тока  $i_1(t)$ , форма которого соответствует закону изменения питающего напряжения  $u_1(t)$ ;
- определение амплитуды потребляемого тока, удовлетворяющей условию баланса мощности в преобразователе.

Реализация отмеченного набора функций возможна при использовании двухконтурной системы управления. Первый контур обеспечивает высокую скорость реакции системы на изменения сигналов рассогласования, необходимую для осуществления высокочастотной импульсной модуляции. Второй контур позволяет реализовать достаточно сложные алгоритмы управления и придает необходимую интеллектуальность и гибкость системе управления преобразователя.

На основе релейного несинхронизированного способа управления проведем синтез первого контура. Получены математические выражения сигналов рассогласования и сигналов управления ключевыми элементами. Приведен вариант построения второго контура на основе микро-

процессорных средств.

Вторая глава посвящена совершенствованию методологии анализа электромагнитных процессов в преобразователях с переменной структурой и недетерминированными моментами коммутации.

В настоящее время не существует аналитических методов решения данной задачи. Кроме того, условия смены структуры электрической цепи находятся из решения трансцендентных уравнений, что требует применения численных методов. Определенные трудности возникают и при поиске корней характеристических уравнений для интервалов времени, в пределах которых электрическая цепь имеет высокий порядок.

Указанные обстоятельства определили интерес к поиску приближенных методов анализа электромагнитных процессов, под которым подразумевается определение мгновенных значений токов и напряжений в узлах и ветвях электрической цепи.

Анализ предусматривает описание математической модели преобразователя, то есть составление совокупности уравнений для определения токов и напряжений, а также условий перехода от одной структуры электрической цепи преобразователя к другой. На примере УСП рассмотрены два подхода к моделированию - точный и приближенный.

Первый основан на составлении и решении операторным методом системы уравнений для каждой конфигурации электрической цепи УСП (см. рис.2). Использование операторного метода, совместно с численными методами решения характеристических уравнений высоких степеней (для схемы "D" имеем четвертый порядок) позволяет определить аналитические выражения для токов и напряжений на интервалах постоянства структуры.

Анализ схемных решений существующих импульсных регуляторов показал, что их реактивные элементы на интервалах постоянства структуры связаны друг с другом таким образом, что всегда можно утверждать о непрерывности токов конденсаторов и напряжений на дросселях. Следовательно, на малых промежутках времени токи конденсаторов и напряжения дросселей силовой цепи УСП можно считать неизменными. Тогда общеизвестные выражения для определения напряжения конденсатора и тока дросселя преобразуются к виду

$$\begin{cases} u_C(t) = U_C(0) + \frac{1}{C} \int i_C(t) dt; \\ i_L(t) = i_L(0) + \frac{1}{L} \int u_L(t) dt; \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} u_C(t) = U_C(0) + i_C \Delta t / C; \\ i_L(t) = i_L(0) + U_L \Delta t / L. \end{cases}$$

Последние уравнения положены в основу приближенной модели УСП, что позволило значительно упростить математическое описание модели и существенно сократить трудоёмкость ее составления.

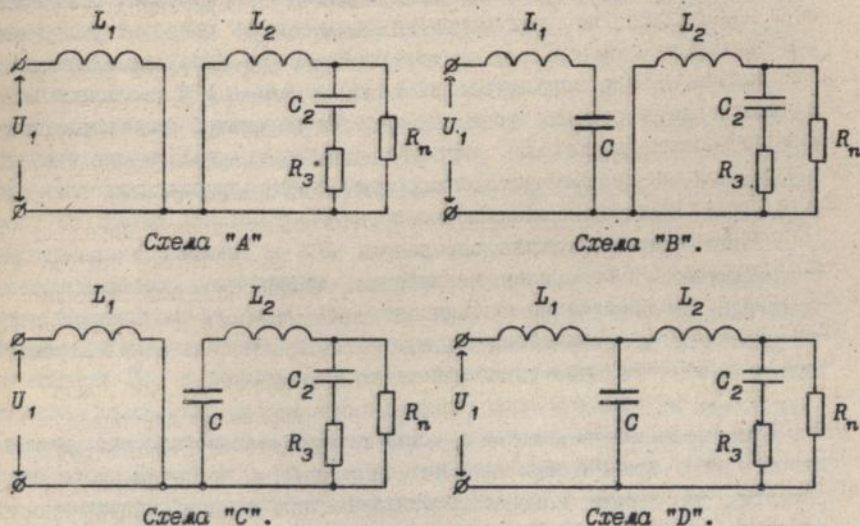


Рис.2

Для анализа электромагнитных процессов в УСП был использован метод приспособывания, когда значения токов и напряжений в ветвях преобразователя определялись пошагово, с учетом текущего состояния системы управления и значений переменных, которые были определены на предыдущем шаге моделирования и использованы в качестве начальных условий для данного шага.

Выбор метода и использование описанного подхода к моделированию не случаен. Из всего многообразия существующих методов анализа устройств преобразовательной техники к преобразователям с переменной структурой и недетерминированными моментами коммутации (к данному классу относятся преобразователи с принудительным формированием кривой потребляемого тока) применимы лишь численные методы. Специфика работы данных устройств связана с широким диапазоном изменения длительности интервалов постоянства структуры. Поэтому при использовании кусочно-прямословочного метода и определений моментов смены структуры на основе методов дихотомии, Ньютона, Симпсона и т.п. могут быть пропущены промежуточные моменты смены структуры. Это не позволяет существенно увеличить шаг моделирования.

В работе на примере УСП проведен сравнительный анализ погрешностей приближенного и точного моделирования который показал, что при достаточно малом шаге моделирования мгновенные значения токов и напряжений, соответствующие двум моделям преобразователя практически совпадают, что подтверждает корректность принятых допущений приближенного моделирования и целесообразность его использования.

Моделирование электромагнитных процессов в УСП различной мощности на ЭЭМ позволило найти оптимальные параметры элементов силовой части УСП, определить структуру и алгоритм работы системы управления и цепи отрицательной обратной связи, проанализировать динамические свойства преобразователя.

Результаты моделирования работы УСП в режимах выпрямителя, стабилизатора постоянного напряжения, инвертора, преобразователя частоты с различными вариантами нагрузки (включая противоэдс) подтвердили многофункциональность приведенной схемы и ее электромагнитную совместимость с питающей сетью и нагрузкой.

Третья глава посвящена анализу гармонического состава потребляемого тока при питании преобразователя от сети переменного напряжения, на основе которого проведена оптимизация индуктивности входного дросселя. В качестве критерия оптимизации выбран минимум частоты импульсной модуляции, который может быть достигнут при заданном уровне искажений потребляемого тока.

В результате исследований получены аналитические выражения для определения коэффициентов разложения в ряд Фурье кривой потребляемого тока УСП, с учетом которых разработана методика гармонического анализа и ее программная реализация.

Получены спектры входного тока УСП (см. рис.3) и однофазных источников вторичного электропитания (ИВЭП) с улучшенной ЭМС, аналогичного принципа действия (см.рис.4), отличающихся от УСП схемой построения импульсного регулятора. Установлено, что количество учитываемых высших гармоник при гармоническом анализе кривой потребляемого тока преобразователей определяется частотой импульсной модуляции. Получена зависимость достоверности результатов гармонического анализа от частоты импульсной модуляции и диапазона учитываемых высших гармоник.

Анализ коэффициента гармоник кривой входного тока преобразователей данного класса показал, что существуют оптимальные соотношения величины индуктивности входного дросселя  $L_1$  и средней частоты импульсной модуляции, при которых обеспечивается требуемое ка-

чество потребляемого тока. На рис.5 показаны данные зависимости, полученные применительно к ИВЭП и УСП для  $K_{\Sigma}=3\%$ . Очевидно, что УСП обеспечивает получение тех же значений коэффициента гармоник потребляемого тока при более низких частотах импульсной модуляции. Этот вывод наглядно подтверждают и кривые на рис.6, соответствующие 3% ному коэффициенту гармоник входного тока ИВЭП и УСП.

Отсутствие искажений начального участка кривой тока УСП является результатом оптимального управления скоростью изменения тока входного дросселя при подключении к нему накопительного конденсатора, что выгодно отличает импульсный регулятор, представленный на рис.1 от других схемных решений.

Четвертая глава работы посвящена исследованию электромагнитных процессов в контуре обратной связи по выходному напряжению. Определены причины искажений потребляемого тока в выпрямителях с улучшенной ЭМС, обусловленные непрерывным характером формирования сигнала отрицательной обратной связи (ООС) и конечным значением емкости конденсаторов выходного фильтра, который не устраняет низкочастотных пульсаций, искажающих эталон потребляемого тока.

Одним из возможных вариантов формирования сигнала ООС УСП может быть дискретная его корректировка. Если коррекция производится в моменты времени, когда мгновенное значение напряжения сети равно нулю, а длительность ее пренебрежимо мала по сравнению с периодом сети, на протяжении которого сигнал ООС  $\delta = const$ , тогда в соответствии с (3) эталон потребляемого тока изменяется по закону приложенного напряжения и модифицируется (от периода к периоду) лишь его амплитудное значение.

Схема импульсного регулятора УСП содержит накопительный конденсатор  $C$ , который выполняет роль буферного источника энергии, покрывающего разность мгновенных значений мощности на входе и выходе УСП. Следовательно, о развитии энергетических процессов, протекающих в преобразователе за некоторый промежуток времени, можно судить по величине отклонения напряжения накопительного конденсатора  $U_c$  относительно его номинального значения  $U_H$ .

Кроме того, по величинам пульсаций напряжения накопительного конденсатора, его статической и динамической неустойчивости в переходных режимах, неизбежных после скачкообразных изменений нагрузки, можно косвенно оценить качество выходного напряжения данного преобразователя.

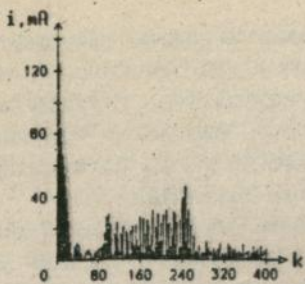


Рис. 3

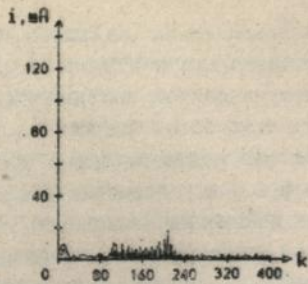


Рис. 4

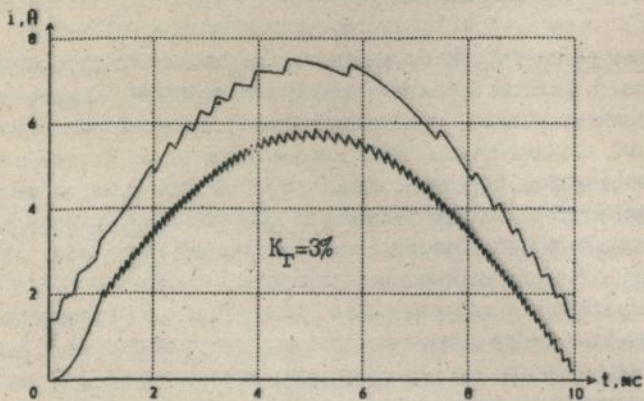


Рис. 5

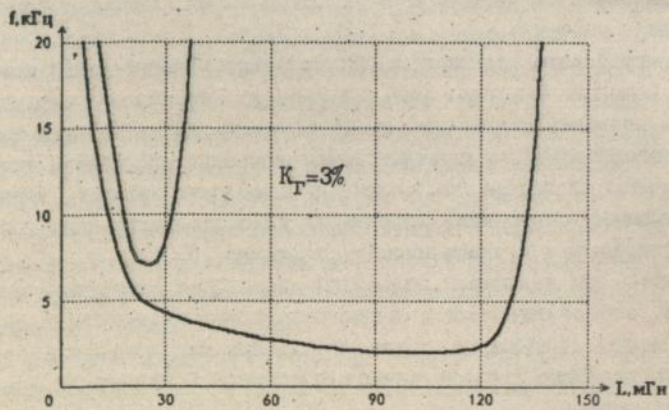


Рис. 6

В аналитической форме закон изменения сигнала ООС имеет вид

$$\delta(n) = \delta(n-1) + h_1 [U_o(n) - U_o(n-1)] + h_2 [U_H - U_o(n)], \quad (4)$$

где  $\delta(n)$  и  $\delta(n-1)$  - соответственно текущее и предыдущее значения сигнала ООС;

$U_o(n)$  и  $U_o(n-1)$  - соответственно текущее и предыдущее значения напряжения накопительного конденсатора;

$U_H$  - номинальное значение напряжения конденсатора  $C$ , соответствующее установившемуся режиму работы УСП;

$h_1$  и  $h_2$  - эмпирические коэффициенты, учитывающие временной интервал между очередными модификациями сигнала  $\delta$ .

Для подтверждения эффективности дискретного формирования сигнала обратной связи на примере УСП был проведен сравнительный анализ указанных подходов к формированию сигнала ООС путем моделирования режимов десятикратного сброса и наброса нагрузки.

Результаты моделирования показали очевидные преимущества дискретного способа формирования сигнала обратной связи, обеспечивающего минимизацию длительности переходного режима после изменения параметров нагрузки при сохранении синусоидальности эталона потребляемого тока даже в переходном режиме. При этом, полученные значения динамической и статической неустойчивости напряжения накопительного конденсатора не ухудшаются.

В этой главе рассматриваются вопросы, связанные с особенностями технической реализации УСП. Приведены принципиальные электрические схемы основных функциональных узлов системы управления и силовых ключей, технические характеристики и результаты испытаний, осциллограммы кривой потребляемого тока УСП, работающего в режиме стабилизированного выпрямителя переменного напряжения, подтверждающие правильность разработанных моделей и методик расчетов.

В приложении приведены разработанные программы анализа электромагнитных процессов в УСП и гармонического анализа потребляемого тока, а также документы о практическом использовании результатов диссертационной работы.

### Выводы

1. В результате проведенных исследований разработаны методики анализа электромагнитных процессов в преобразователях с принудительным формированием кривой потребляемого тока, позволяющие при приемлемой точности существенно упростить описание математической модели преобразователей.

2. Проведен сравнительный анализ составляющих погрешности точной и приближенной методик моделирования, который подтвердил корректность принятых допущений и приемлемую точность результатов моделирования.

3. Исследованы пути создания высокоэффективных однофазных преобразователей на основе мостовых схем с использованием ключей переменного тока с высокочастотным принципом управления, обеспечивающие наряду с принудительным формированием потребляемого тока двусторонний обмен энергии между источником и нагрузкой при пониженной частоте импульсной модуляции.

4. Сформулированы основы построения УСП, предложена оригинальная схема силовой части преобразователя и синтезирован вариант его системы управления.

5. Получены аналитические выражения и алгоритм гармонического анализа, на основе которых определен коэффициент гармоник кривой потребляемого тока при различных режимах работы преобразователя.

6. Определены критерии оптимизации индуктивности входного дросселя и получены соответствующие аналитические зависимости, позволяющие при заданной частоте импульсной модуляции и требуемом уровне коэффициента гармоник потребляемого тока осуществить обоснованный выбор указанного параметра.

7. Установлено, что возможность оперативного управления скоростью изменения тока входного дросселя, характерная для УСП, позволяет уменьшить частоту работы переключающих элементов при сохранении требуемого коэффициента гармоник потребляемого тока.

8. Получены спектры кривых потребляемого тока преобразователей, при работе на различных частотах импульсной модуляции и установлена зависимость достоверности результатов гармонического анализа от количества учитываемых высших гармоник.

9. Установлены причины искажений потребляемого тока и факторы, влияющие на нестабильность выходного напряжения, для устранения которых коррекцию сигнала отрицательной обратной связи по вы-

ходному напряжению предложено осуществлять на основе дискретных систем с синхронизацией по входному напряжению.

10. Разработаны алгоритм работы и аппаратурная реализация программного контура управления, позволяющие минимизировать длительность переходного процесса при резких изменениях параметров нагрузки и обеспечить высокое качество потребляемого тока и выходного напряжения.

11. Результаты исследований использованы в следующих разработках: стабилизатор напряжения однофазной сети для питания устройств отображения информации в СКБ "Ритм"; агрегат бесперебойного электропитания для средств вычислительной техники в ПО "Электрон-маш"; централизованный стабилизатор напряжения систем электропитания судовых радиоэлектронных комплексов в НИИ "Квант" г.Киев.

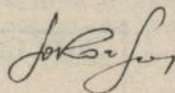
#### Основные публикации по теме диссертации:

1. *Козлов Ю.В.* Особенности построения системы автоматического управления универсальным полупроводниковым преобразователем // Импульсные ИВЭ. Состояние и перспективы развития. Тез.докл. отраслевого семинара. (Севастополь, 1989). - М., 1989. - С.118-120.
2. *Козлов Ю.В.* Построение мощных однофазных стабилизированных выпрямителей с улучшенной электромагнитной совместимостью // Проблемы преобразовательной техники: Тез.докл. V Всесоюз. научно-техн. конф. Чернигов, 16-20 сент. 1991. - Киев: Ин-т электродинамики АН УССР, 1991. - кн.5, С.69-71.
3. *Козл. В. Ю.В.* Организация обратной связи в преобразователях с принудительным формированием потребляемого тока // Электромеханические и полупроводниковые преобразователи электроэнергии: Сб. науч. тр. - Киев: Ин-т электродинамики АН Украины, 1992, С.10-16.
4. *Комаров Н.С., Москаленко Г.А., Козлов Ю.В.* О возможности создания универсального статического преобразователя с улучшенной электромагнитной совместимостью // Импульсные ИВЭ. Состояние и перспективы развития. Тез.докл. отраслевого семинара. (Севастополь, 1989). - М., 1989. - С.107-109.
5. *Шидловский А.К., Козлов Ю.В., Комаров Н.С., Москаленко Г.А.* Универсальный статический преобразователь с улучшенной электромагнитной совместимостью - Киев. 1990. - 44с. (Преп./Ин-т электродинамики АН УССР; № 664).
6. *Шидловский А.К., Козлов Ю.В.* Выбор параметров входной цепи универсального статического преобразователя с учетом искажений потребляемого тока // Техн. электродинамика. 1991. № 22-29.

7. Козлов Д.В., Кулешов А.Ю. Определение коэффициента гармоник потребляемого тока преобразователей с улучшенной электромагнитной совместимостью //Проблемы преобразовательной техники: Тез.докл. У Всесоюзн.научно-техн.конф., Чернигов,16-20 сент.1991.-Киев: Ин-т электродинамики АН УССР, 1991.-кн.5, С.72-74.
8. Козлов Д.В., Комаров Н.С., Кулешов Ю.Е., Москаленко Г.А. Анализ электромагнитных процессов в следящих импульсных преобразователях с переменной структурой. - Киев. 1992.- 45с. (Преп./Ин-т электродинамики АН Украины; № 725).
- 9.Козлов Д.В., Кулешов Ю.Е. Моделирование электромагнитных процессов в универсальном статическом преобразователе //Тез.докл. 44 научн. и 12 научн.-методической конф. профессорско-преподавательского состава КТИЛП, -Киев: КТИЛП, 1992, С.120.
10. Мартынов В.В., Козлов Д.В. Однофазный стабилизированный выпрямитель с гальванической развязкой //Тез.докл.второй научно-техн. конф."Электромагнитная совместимость технических средств",Санкт-Петербург, 8-10 сент.1992.-Судостроение, С.53-54.
11. А.С. №1543508 СССР, МКИ Н 02 М 5/02, 3/04. Статический преобразователь/ Шидловский А.К., Комаров Н.С., Москаленко Г.А., Козлов Ю.В., Кулешов Ю.Е. - Оpubл. 22.02.1990, Бюл. № 6.
12. А.С. №1758805 СССР, МКИ Н02 М7/04. Преобразователь переменного напряжения в постоянное/ Шидловский А.К., Комаров Н.С. Козлов Ю.В. Москаленко Г.А., Кулешов Ю.Е. - Оpubл. 30.08.1992, Бюл. № 32.

Личный вклад автора. Основные научные результаты опубликованы в трех работах, написанных автором самостоятельно и девяти работах, написанных в соавторстве. Из последних в [4] автором предложена структура и алгоритм работы системы управления УСП; в [5,8,9] дано описание математических моделей УСП и программная реализация процесса моделирования на ЭВМ; в [6] получены аналитические выражения и разработан алгоритм гармонического анализа кривой потребляемого тока; в [7] установлена зависимость между частотой импульсной модуляции и погрешностью определения коэффициента гармоник потребляемого тока; в [10] разработана математическая и программная части моделирования однофазного стабилизированного выпрямителя с гальванической развязкой; в [11-12] идеи изобретений принадлежат соавторам в равной мере.

Соискатель



Подписано к печати 31.05.1994г. Формат 60x84/16  
Бумага офсетная Усл.-печ. лист. 1,0. Уч.-изд. лист 1,0.  
Тираж 100. Заказ 277. Бесплатно

---

Полиграф. уч-к Института электродинамики АН Украины  
252057, Киев-57, проспект Победы, 56.

457990

Ag 30.516

**AB 30.516**

1950

1950

1950

1950

1950

1950

1950