

КИЕВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

МАКДИСИ КАРЛО  
/Сирия/

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТЫ  
АВТОНОМНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Специальность 05.09.12 – Полупроводниковые преобразователи  
электроэнергии

А в т о р е ф е р а т  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Киев - 1993

AB 27.467



00814327 (P)

теоретическая основ электротех-  
ники Киевского политехнического института

Научный руководитель - лауреат Государственной премии  
Украины, доктор технических наук,  
профессор В.И.СЕНЬКО

Научный консультант - кандидат технических наук,  
доцент А.В.ГАЛИНОВСКИЙ

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
старший научный сотрудник  
В.С.ФЕЛИИ

кандидат технических наук,  
доцент Ю.Е.КУЛЕНОВ

Ведущая организация - институт проблем энергосбережения  
АН Украины

Защита состоится "21" ИЮНЯ 1993 г. в 15 часов на  
заседании специализированного Совета К 068.14.05 при Киевском  
политехническом институте /252056, г.Киев-56, проспект Победы,  
37/.

Автореферат разослан "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1993 г.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института

Ученый секретарь  
специализированного Совета  
к.т.н., доцент

Б.Н.КОНДРА

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. При решении задач повышения эффективности общественного производства и увеличения производительности труда большое значение приобретает рациональное использование энергетических ресурсов, значительная экономия которых может быть достигнута сосредоточением усилий по совершенствованию методов преобразования и передачи электрической энергии. Все возрастающий уровень производства и потребления электрической энергии заставляет обращать особое внимание на совершенствование всех видов ее распределения и применения. Решение этой задачи непосредственно связано с развитием силовой преобразовательной техники, с разработкой эффективных методов и средств преобразования различных параметров электрической энергии. Успехи энергетической электроники в настоящее время обеспечили прогресс в деле создания и совершенствования силовой преобразовательной техники, открыв широкие возможности и перспективы ее применения в различных областях народного хозяйства. Преобразовательная техника находит все более широкое применение везде, где производится и используется электроэнергия.

Решая задачу значительного увеличения производства силовой преобразовательной техники необходимо особое внимание уделять разработке и освоению выпуска электротехнического оборудования, имеющего более высокий коэффициент полезного действия, меньший удельный расход цветных металлов и других материалов.

Важное место в решении этих задач занимает совершенствование систем электроснабжения автономных электроэнергетических комплексов, где экономическая эффективность снижения массы оборудования и потребляемой мощности особенно велика.

В связи с тем, что на борту автономных комплексов постоянно увеличивается количество нагрузок, для которых по ряду причин род питающего тока, величина напряжения и частоты, а также допуски на их отклонения отличаются от параметров первичной системы электроснабжения /ПС/, возрастает роль вторичных систем электроснабжения /ВСЭ/, обеспечивающих такие потребители электроэнергией. Противоречие между тенденцией к увеличению необходимой мощности узлов генерирования электроэнергии и требованием уменьшения массы и объема всего энергетического комплекса можно разрешить только реализацией двух процессов: повышени-

ем эффективности всех потребителей энергии и повышением эффективности всех преобразователей энергии, поскольку дальнейшие работы в области совершенствования каналов генерирования электроэнергии уже не могут дать ощутимого выигрыша в массе. Повышение эффективности ВЭС может быть достигнуто путем использования новых способов преобразования параметров электроэнергии и новых принципов построения преобразователей, их реализующих, на основе достижений в разработке устройств энергетической и информационной электроники.

Ускорение внедрения результатов научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по разработке преобразователей ВЭС в производство возможно только при использовании прогрессивных методов построения и компоновки и, в частности, широкое применение модульного принципа с использованием унифицированных узлов и агрегатов.

Возросшие требования, предъявляемые к качеству выходных параметров преобразователей ВЭС требуют в настоящее время разработки таких устройств, которые сочетали бы в себе функции формирования высококачественного переменного напряжения заданной формы и широкодиапазонного регулирования /стабилизации/ его параметров, обеспечивая при этом высокие энергетические и динамические показатели преобразователей. Такие преобразователи необходимы для систем регулируемого электропривода переменного тока точной аппаратуры магнитной записи /МЗ/, контрольно-испытательной и исследовательской аппаратуры, например, имитаторов с произвольной формой выходного напряжения и с регулированием относительного содержания отдельных гармоник или массива гармоник в спектре выходного напряжения, исполнительных органов автоматизированных систем управления, систем воспроизведения и усиления информации, устройств автоматики и телемеханики, для потребителей, критичных к форме питающего напряжения, аппаратуры резервного электропитания.

На решение этих задач направлены работы, проводимые на кафедре теоретических основ электротехники Киевского политехнического института в соответствии с координационным планом АН Украины по комплексной проблеме "Научные основы электроэнергетики" на 1991 - 1995 г.г.

Поэтому разработка и исследование высокоскоростных преобразователей ВЭС автономных комплексов, выполненных на основе мо-

дульных блоков из унифицированных элементов и узлов, является актуальной задачей.

Цель работы - решение научной задачи исследования и разработки полупроводниковых преобразователей частоты вторичных систем электроснабжения автономных комплексов, обладающих улучшенными показателями.

Достижение поставленной цели предопределяет необходимость решения следующих задач:

1. Исследование и разработка эффективных способов преобразования параметров электрической энергии автономных комплексов.
2. Исследование электромагнитных процессов в преобразователях частоты и получение аналитических выражений искомых величин в удобной для практического использования форме.
3. Обоснование построения, анализа и оптимизации преобразователей частоты в автономных системах электроснабжения подвижных объектов.
4. Разработка способов формирования квазисинусоидального напряжения, принципов построения ключей переменного тока, схем систем управления и конкретных устройств, реализующих многоканальный способ преобразования параметров электрической энергии во вторичных системах электроснабжения автономных комплексов.

Методы исследования. Для решения поставленных в работе задач использованы методы: коммутационных функций, комбинированный, гармонического синтеза, математический аппарат, преобразования Тейлора, модифицированный метод Пауэла. При количественном анализе полученных функциональных зависимостей применялась ЭМ. Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций работы подтверждена экспериментально при лабораторных испытаниях созданного преобразователя частоты.

Научная новизна. 1. Обоснована целесообразность построения полупроводниковых преобразователей автономных комплексов на основе преобразователей частоты с суммированием в общем контуре напряжений однофазных регулируемых инверторов переменного напряжения, реализующих многоканальный способ преобразования параметров электрической энергии и обладающих возможностью использования модульного принципа конструирования с максимальной степенью унификации на основе стандартных элементов и узлов.

2. Предложена методика анализа электромагнитных процессов в непосредственном преобразователе частоты с квазиоднополосной

модульной, позволяющая получить в замкнутом виде зависимости действующих значений и выходных напряжений от параметра управления.

3. Предложена и разработана методика определения в замкнутом виде основных интегральных показателей напряжения, реализующего АИМ 2-го рода, на основе преобразования Тейлора.

4. Определены оптимальные фазовые соотношения между выходными напряжениями регулируемых однофазных инверторов переменного тока, формирующих однофазное или трехфазное квазисинусоидальной формы выходное напряжение.

5. Предложены принципы построения силовых схем и систем управления непосредственных преобразователей частоты с квазисинусоидальной формой выходного напряжения.

6. Обоснована целесообразность построения силовых схем преобразователей частоты вторичных систем электроснабжения на базе тиристорно-транзисторных ключей.

Автор защищает. I. Принципы построения вторичных систем электроснабжения автономных комплексов на базе непосредственных преобразователей частоты, расчета параметров и характеристик с учетом специфики процессов в системе электроснабжения.

2. Методику анализа электромагнитных процессов в преобразователях частоты для квазиустановившихся процессов.

3. Методику и аналитические выражения для определения в замкнутом виде основных интегральных характеристик квазисинусоидальных напряжений, формируемых методами АИМ 2-го рода.

4. Принципы построения силовых ключей и схем систем управления и конкретные устройства, реализующие многоканальный способ преобразования параметров электрической энергии.

Практическая ценность. Приведенные в работе выводы, зависимости, графики обеспечили возможность оптимального проектирования непосредственных преобразователей частоты с однофазными и трехфазными выходными напряжениями на основе высоконадежных базовых модулей, выполненных на полностью управляемых ключах переменного тока. Модульный принцип построения силовых схем преобразователей существенно упростил процесс проектирования и производства предлагаемых преобразователей частоты.

Реализация результатов работы в промышленности. Результаты исследований нашли практическое применение при разработке и изготовлении полупроводниковых преобразователей частоты по дого-

вору № 2258 от 01.04.1991 г., выполняемого кафедрой теоретических основ электротехники. Некоторые теоретические и практические результаты, полученные в работе, будут использоваться в учебных курсах КИИ при подготовке специалистов по электроприводу и электрическим машинам.

Апробация работ. Основные положения и результаты работы докладывались на научных семинарах АН Украины "Научные основы электроэнергетики" и научном семинаре кафедры электроники и энергетики Университета г.Летакии /Сирия/.

Основное содержание работы опубликовано в 2-х статьях.

Структура и объем работ. Диссертация состоит из введения, четырех разделов и заключения, изложенных на 130 страницах машинописного текста, 72 рисунков на 70 страницах и 3 таблиц на 2 страницах, списка литературы из 104 наименований и 2 приложений на 11 страницах. Общий объем работы составляет 227 страниц.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы и сформулирована цель исследований, перечислены основные научные результаты, приведены положения, выносимые на защиту.

В первом разделе дана характеристика первичных и вторичных систем электроснабжения автономных комплексов и способов преобразования параметров электрической энергии, используемых при построении ВСЭ.

В настоящее время большая часть электрической энергии, вырабатываемой в стране, преобразуется на пути к потребителю. Такое преобразование осуществляется ВСЭ в случае, если параметры электрической энергии /род питающего тока, величина напряжения или частоты, а также допуски на их отклонения/ отличаются от параметров электроэнергии, обеспечиваемых ПСЭ и требуемых для нормальной работы потребителя.

В качестве ПСЭ могут использоваться: сети электроснабжения общего назначения; автономные системы /система электроснабжения самолетов и вертолетов, система электроснабжения кораблей, местные сети электроснабжения/; химические источники тока.

При разработке преобразователей ВСЭ автономных комплексов, содержащих в качестве ПСЭ электромашинные генераторы постоянного и переменного тока, необходимо учитывать возможность кратко-

временного повышения питающего напряжения в переходных режимах. Так в ПСЭ автономных комплексов /ГОСТ 19705-74, 19705-81/ переменного трехфазного тока переменной частоты /320...1050 Гц/ и фазным напряжением 115 В в переходном режиме возможно в течение 0,2...0,5 с повышение напряжения, в зависимости от выходной частоты, до 180 В при 400 Гц и соответственно до 472,5 В при 1050 Гц /рис. 1/.

Некоторые потребители автономных комплексов требуют высокостабильного по напряжению и частоте переменного тока /троскопические приборы, аппаратура магнитной записи/; анодные цепи радиоустановок требуют высокого напряжения постоянного тока; специального питания требуют также радиолокационное оборудование, штурманско-навигационные системы, системы автоматического управления, следящие системы, усилители и другого типа приборы и устройства.

ВСЭ автономных комплексов обеспечивает указанные выше потребители напряжением с требуемыми параметрами. При заводской настройке кассет гиromоторов, стоек летательных аппаратов, усилителей звуковой частоты, для питания контрольно-измерительной аппаратуры также требуются ВСЭ, обеспечивающие такие же параметры электрической энергии, как в автономных комплексах.

В ВСЭ автономных комплексов находит широкое применение электромашинные преобразователи /ЭМП/ с выходной частотой 400 Гц. Удельные характеристики таких преобразователей значительно уступают электромашинным генераторам ПСЭ, а требования, предъявляемые современными системами вычислительной техники, аппаратурой автоматики и управления к электрическим системам с частотой 400 Гц, не могут быть ими удовлетворены в полной мере.

Ограниченные возможности ЭМП открывают широкую возможность перед статическими преобразователями, позволяющими в зависимости от типов преобразования получать при высоких эксплуатационных характеристиках удельные характеристики порядка 300 ... ..1000 Вт/кг.

Возрастающая сложность задач, решаемых РЭА, устанавливаемой на автономных комплексах, повышает требования к качеству питающего напряжения. Для согласования параметров электроэнергии, необходимой конкретным потребителям, и параметров ПСЭ в ВСЭ находят применение следующие четыре типа преобразователей: ИВЭ, ЦАПЧН, ПНН, ФН. В работе рассмотрены особенности и структурные

схемы указанных выше преобразователей. С целью повышения быстродействия преобразователей в отработке возмущающих воздействий, а также уменьшения массы и габаритов точечных изделий, в последние годы в ВЭС нашли применение преобразователи с промежуточным звеном высокой частоты и прямоугольной /несинусоидальной/ формой выходного напряжения. В работе показано, что повышение эффективности преобразователей ВЭС автономных комплексов на мощности единицы-десятки кВА может быть достигнуто не только за счет использования промежуточного повышения частоты, но и за счет перехода от прямоугольной формы высокочастотного напряжения к квазисинусоидальной. При этом для получения квазисинусоидального регулируемого по амплитуде напряжения при выходных мощностях 1...10 кВА необходимо применять специальные способы улучшения спектрального состава кривой напряжения, обеспечивающие, как получение высокого КПД, так и расширение функциональных возможностей и характеристик таких преобразователей.

Процесс формирования /синтезирования/ кривой выходного напряжения ПЧ с требуемым гармоническим составом может быть непрерывным или дискретным. Непрерывное синтезирование кривой напряжения на нагрузке получают путем введения в схему ПЧ электрических фильтров.

Дискретное синтезирование подразумевает аппроксимацию выходного сигнала, например, кусочно-постоянной функцией, реализация которой представляет собой периодическую последовательность импульсов в общем случае прямоугольной формы, модулированную по закону выходного сигнала. Целесообразность использования модуляционных методов синтезирования напряжения обусловлена возможностью устранения выходных фильтров, жесткостью внешней характеристики ПЧ, согласованием с ключевым характером работы силовых полупроводниковых приборов, обеспечиваемым высоким КПД, возможностью совмещения функций формирования и регулирования напряжения в едином функциональном узле.

Анализ способов формирования и регулирования выходных напряжений квазисинусоидальной формы показал, что наиболее целесообразно при построении ПЧ с однофазным или трехфазным выходным напряжением и выходной мощностью более 1 кВА использовать МСП параметров электрической энергии на основе схем с суммированием в общем контуре /СОК/ выходных напряжений однофазных регулируемых инверторов, сдвинутых относительно друг друга и имеющих оди-

наковую частоту и скважность:

$$U_{вых} = \frac{4E}{\pi} \sum_{\varphi=1}^{\infty} \frac{\cos(\varphi\alpha/k)}{\varphi} \left( \sum_{n=1}^k \cos \varphi k_n \right) \sin \varphi \vartheta \quad - \text{ для четного } N,$$

$$U_{вых} = \frac{4E}{\pi} \sum_{\varphi=1}^{\infty} \frac{\cos(\varphi\alpha/k)}{\varphi} \left( \frac{1}{2} + \sum_{n=1}^{k-1} \cos \varphi k_n \right) \sin \varphi \vartheta \quad \text{для нечетного } N$$

где  $E$  - амплитудное значение однофазных суммируемых напряжений. Это позволяет повысить эффективность преобразования по сравнению со схемами, содержащими предварительный регулятор постоянного напряжения, а также использовать модульный принцип при конструировании, что упрощает процесс проектирования и производства таких преобразователей. Регулирование же выходного напряжения в таких преобразователях можно осуществить двумя способами: либо за счет ШИМ в каждом из инверторов, либо за счет суммирования двух КСН неизменной формы, сдвигаемых друг относительно друга /фазовое регулирование/. Именно выбор этих экономичных способов регулирования и определял целесообразность формирования КСН, а не трапецидальной с ограниченной длительностью фронта, что было бы вполне приемлемо с точки зрения уменьшения динамических потерь при его демодуляции, ибо только при регулировании КСН обеспечивается практически неизменная величина  $K_t$  выходного напряжения в широком диапазоне изменения величины выходного напряжения. Помимо этого переход к квазисинусоидальной форме высокочастотного напряжения позволяет обеспечить возможность плавного регулирования амплитудного и среднего значения напряжения при сохранении его формы.

Многоканальный принцип преобразования параметров электрической энергии может быть реализован не только на базе ключей постоянного тока, но и с помощью ключей переменного тока с двухсторонней проводимостью. Учитывая непринципиальные отличия спектров выходного напряжения таких ПЧ от аналогичных спектров радиотехнических устройств, реализующих однополосную модуляцию, которые вызваны лишь спецификой модулирующих воздействий, нами показано, что такие преобразователи целесообразно обозначить как НПЧ с КМ. Это позволило помимо объединения в один класс большого числа известных преобразовательных устройств с аналогичными структурно-алгоритмическими свойствами упорядочить терминологию в обозначении таких ПЧ, а также наметить новые возможные пути технической реализации таких устройств.

Структурная схема НПЧ с КМ содержит при трехфазной питающей сети три модулятора М, каждый из которых выполнен в виде  $\surd$  параллельно соединенных по входу и последовательно по выходу однофазных регулируемых инверторов на ключах с двусторонней проводимостью. Наиболее полно и однозначно процесс формирования выходного напряжения в НПЧ с КМ определяет выражение

$$U_{iA} = \sum_{i=1}^3 U_{ni} \cdot \Psi_{ni}^2 = U_{iA} \Psi_{iA}^2 + U_{iB} \Psi_{iB}^2 + U_{iC} \Psi_{iC}^2$$

где  $U_{iA} = E_m \cos[\omega t - (i-1) \cdot 2\pi/3]$  - выходное напряжение ПСЭ,

$$\Psi_{ni}^2 = \sum_{q=1}^{\infty} u(q, \dots) \cos q[\omega t - (i-1) \cdot 2\pi/3]$$
 - эквивалентное

модулирующее воздействие,  $u(q, \dots)$  - амплитуда  $q$ -й гармоники, зависящая в общем случае от ряда параметров  $\alpha, \beta, \gamma, \dots, h$   
 $\omega_1$  и  $\omega_M$  - соответственно частота выходного напряжения ПСЭ и переключения ключей модулятора.

В работе использовано известное из теории однополюсной модуляции свойство, что чисто однополюсный сигнал может быть выделен при соответствующем приближении формы модулирующего воздействия к синусоидальной. Следовательно, по мере приближения формы к синусоидальной должен улучшаться гармонический состав выходного напряжения НПЧ с КМ. Именно это положение и легло в основу предложенных способов формирования КСН.

Во втором разделе проведен анализ электромагнитных процессов в непосредственных преобразователях частоты. Показана целесообразность использования метода коммутационных функций в сочетании с методом гармонического синтеза для анализа процессов в преобразователях частоты, реализующих многоканальный способ преобразования параметров электрической энергии. Получены в замкнутом виде выражения для действующих значений и Кг выходных напряжений преобразователей частоты с квазиоднополюсной модуляцией. Обосновывается методика и расчетные соотношения приведения к замкнутому виду выражений для интегральных показателей на основе преобразования Тейлора.

В связи с широким применением ВП в народном хозяйстве, разработкой и внедрением новых, более сложных схем преобразования вопросы расчета их нормальных и аварийных режимов приобретают все большую актуальность. В настоящее время все большее распространение для анализа электромагнитных процессов в ВП находят ме-

тоды отдельных составляющих и коммутационных функций.

В тех случаях, когда необходимо получение в замкнутом виде выражений для средних и действующих значений несинусоидальных токов и напряжений, коэффициентов гармоник, а также для анализа погрешности, возникающей при учете в расчетах конечного числа членов последующего ряда, целесообразно применение метода коммутационных функций в сочетании с методом гармонического синтеза.

В соответствии с предложенной в работе методикой анализа, величина действующего значения и  $K_T$  выходного напряжения НПЧ с КМ может быть определена по формулам

$$I_{\Sigma} = \frac{1,5 E_m}{\sqrt{2}} \sqrt{A}; \quad K_T = \sqrt{A - \sum_{q=1}^{\infty} M^2(q, \dots)} / \sum_{q=1}^{\infty} M(q, \dots),$$

где

$$A = \sum_{q=1}^{\infty} M^2(q, \dots) - \sum_{q=1}^{\infty} M^2(3q, \dots).$$

Именно переход к этой форме записи позволил по известной величине  $\psi_{Ni}^*$  определить выражение для действующего значения и  $K_T$  напряжения НПЧ с КМ в замкнутом виде.

В работе разработана методика приведения функциональных рядов к замкнутому виду независимо от их сходимости, которая проиллюстрирована на примере определения  $K_T$  выходного напряжения НПЧ с КМ при условии кусочно-постоянного эквивалентного модулирующего воздействия  $\psi_{Ni}^*$ . Методика является универсальной, так как позволяет производить оптимизацию модулирующего воздействия при любом числе фаз питающего напряжения. Единственным условием, которому должен удовлетворять исходный ряд, является существование производных высших порядков, т.е. его непрерывная дифференцируемость.

Получение в замкнутом виде выражений для средних, действующих значений и  $K_T$  выходных КСН позволило существенно уменьшить затраты машинного времени на их расчет, а также решить задачу оптимального формирования КСН для выбранной структуры преобразователя.

При неизвестной форме воздействующего напряжения найти мгновенное значение тока на любом интересующем нас интервале работы ВП позволяет предложенный комбинированный способ, основанный на методе коммутационных функций и методе отдельных составляющих. Данный способ позволяет сочетать все положительные свой-

ства обоих методов. Изображение выходного напряжения при известном алгоритме работы ключей ВП может быть представлено в виде

$$\begin{aligned} \bar{U}_{\text{вых}}(p) &= \bar{U}_{\text{вх}}(p) * \Psi(p) = \sum_{k=1}^n \text{Res}[\bar{U}_{\text{вх}}(p_k) \Psi(p-p_k)] = \\ &= \sum_{k=1}^n \text{Res}[\Psi(p_k) \bar{U}_{\text{вх}}(p-p_k)], \end{aligned}$$

где  $n$  - число полюсов  $\bar{U}_{\text{вх}}(p)$  или  $\Psi(p)$

Определив изображение выходного напряжения  $\bar{U}_{\text{вых}}(p)$  с помощью метода отдельных составляющих, можно найти токи на отдельных интервалах периода. Предлагаемая методика рассмотрена на нескольких примерах определения мгновенных значений токов и напряжений в различных ВП.

В третьем разделе рассмотрены способы формирования квазисинусоидального напряжения, а также принципы построения силовых схем преобразователей частоты с квазиоднополосной модуляцией, реализующих многоканальный способ преобразования параметров электрической энергии. Проводится оптимизация формы выходного напряжения ПЧ при амплитудно-импульсной аппроксимации его по синусоидальному закону и  $M$ -ступенчатой форме эквивалентного модулирующего воздействия. Приводятся зависимости средних и действующих значений, а также Кг выходного напряжения ПЧ от параметра управления. Рассматриваются особенности построения автономных систем электроснабжения автономных комплексов на базе непосредственных преобразователей частоты с квазиоднополосной модуляцией.

В работе показано, что двухзвенные ПЧ, реализующие МСП параметров электрической энергии, могут быть использованы при построении высокочастотных преобразователей с однофазным или трехфазным выходным напряжением при относительно незначительных перенапряжениях на выходе ПСЭ. Это связано с тем, что в автономных системах электроснабжения нельзя применять схемы выпрямления, обеспечивающие подачу в систему распределения электроэнергии постоянной составляющей тока /например, трехфазной схемы со средней точкой/. Применение же мостовой трехфазной схемы выпрямления приводит к чрезмерно высоким величинам выходного напряжения в переходном режиме, превышающим предельно допустимую величину рабочего напряжения серийно освоенных транзисторов.

Исследования показали, что уменьшить в  $\sqrt{3}$  раз величину постоянного напряжения, прикладываемого к силовым транзисторам

преобразователя, позволяет переход от двухзвенных ПЧ к НПЧ с КМ, выполненных на ключах с двусторонней проводимостью и также обеспечивающих МСН параметров электрической энергии. Оптимизация  $\psi_{Ni}^3$  показала, что минимальные значения Кг выходного напряжения НПЧ с КМ при заданном  $N$  обеспечиваются при иных, чем в двухзвенных ПЧ фазовых соотношениях между ступенями аппроксимируемого напряжения. Причем форма оптимального  $\psi_{Ni}^3$  указывает на явное содержание в нем гармонических составляющих кратных трем. Это связано с тем, что в спектре выходного напряжения НПЧ с КМ отсутствуют комбинационные гармоники, определяемые гармоническими составляющими  $\psi_{Ni}^3$  кратными трем. Именно это свойство и использовалось в работе для получения в замкнутом виде выражений для средних, действующих и Кг выходных напряжений НПЧ с КМ /рис. 2/. Минимальное отличие  $N$  ступенчатой аппроксимируемой по синусоиде кривой от оптимальной обеспечивается, если величины нулевой паузы и фазового сдвига кратны дискретному углу  $\delta/(6N)$ . Качество выходного напряжения в НПЧ с КМ определяется видом модулирующего воздействия, способ формирования которого и положен в основу предложенной классификации НПЧ с КМ.

НПЧ с КМ и СОК позволяют создавать автономные СЭС с высокими параметрами электрической энергии. Нами предложен ряд автономных СЭС подвижных объектов с переменной скоростью вращения вала электрического генератора для получения стабильной выходной частоты на основе НПЧ с КМ и СОК  $K_g = 15...20\%$  при  $\omega_x / \omega_{x,max} = 1...0,7$ . Разработанные СЭС обеспечивают защиту цепей нагрузки от перенапряжений во время переходных процессов в синхронном генераторе и неизменный фазовый сдвиг основной гармоники в процессе регулирования выходного напряжения.

Дальнейшее улучшение массо-габаритных показателей СЭС может быть достигнуто путем использования возможностей системного проектирования, при котором генератор и ПЧ разрабатываются совместными усилиями разработчиков этих звеньев системы и применением промежуточного повышения частоты /рис. 3/.

В четвертом разделе рассматривается техническая реализация высокoeffективных полупроводниковых преобразователей частоты. Приведены схемы тиристорно-транзисторных силовых ключей, позволяющих повысить надежность и нагрузочную способность ПЧ, а также расширить их функциональное назначение. Рассматриваются особенности построения СУ преобразователей ВСЭ и НПЧ с КМ в режиме

стабилизации выходной частоты и построение автономных систем электроснабжения на базе генератора-модулятора.

Значительное внимание в работе уделено вопросам технической реализации однофазных инверторов с выходной частотой порядка 20 кГц. Стремление увеличить нагрузочную способность транзисторов по току при одновременном уменьшении величины мгновенной мощности, выделяемой на транзисторе, привело к разработке тиристорно-транзисторных ключей /ТТК/, обеспечивающих облегченный режим работы силового транзистора, что в итоге позволило улучшить массогабаритные показатели инверторов, повысить их надежность. Разработанные модули инверторных ячеек имеют удельные показатели: при  $f_{вых} = 320 \dots 1050$  гц  $600 \dots 1000$  Вт/кг; при  $f_{вых} = 20$  кГц  $400 \dots 500$  Вт/дм<sup>3</sup>,  $500 \dots 600$  Вт/кг. /инверторная ячейка содержит силовую часть, систему управления и блок защиты/.

Рассмотрены особенности построения стабилизаторов частоты на основе НПЧ с КМ. Показано, что стабилизацию выходной частоты в НПЧ с КМ при переменной частоте ПСЭ можно осуществить, используя либо замкнутые системы автоматического регулирования, либо параметрический способ стабилизации, основанный на взаимной компенсации отклонений частот выходного и управляющего напряжений, причем требуемая фазность и качество управляющего напряжения обеспечивается введением в СУ умножителя частоты, выполненного по принципу амплитудно-импульсных систем с фазовой автоподстройкой частоты.

В приложении приводятся программы расчета основных характеристик непосредственных преобразователей частоты, акт внедрения результатов работы в учебный процесс и справки об использовании результатов диссертационной работы.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Показано, что одним из направлений, обеспечивающих построение высокоэффективных полупроводниковых преобразователей электроэнергии вторичных систем электроснабжения, является использование рациональных структур, позволяющих реализовать многоканальный способ преобразования параметров электрической энергии на основе схем непосредственных преобразователей частоты с суммированием в общем контуре напряжений однотипных инверторов переменного тока, обладающих возможностью использования модульного принципа конструирования с максимальной степенью унификации

на основе стандартных элементов и узлов. Показано, что с целью уменьшения массы и габаритов моторных изделий и улучшения динамических характеристик, целесообразно использование в преобразователях промежуточного звена повышенной частоты квазисинусоидальной формы.

2. Показано, что применение метода коммутационных функций в сочетании с методом гармонического синтеза целесообразно для получения в замкнутом виде выражений для средних и действующих значений несинусоидальных токов и напряжений, коэффициентов гармоник, а также для анализа погрешности, возникающей при учете в расчетах конечного числа членов исследуемого ряда; при этом знать форму воздействующего напряжения не обязательно.

3. Предложена методика анализа электромагнитных процессов в непосредственных преобразователях частоты, позволяющая по виду эквивалентного модулирующего воздействия получить в замкнутом виде выражения для действующих значений и  $K_g$  выходных напряжений и решить задачу оптимального синтеза эквивалентного модулирующего воздействия.

4. Показано, что повышение эффективности преобразователей ВЭС автономных комплексов может быть достигнуто за счет применения непосредственных преобразователей частоты. При этом качество выходного напряжения НПЧ определяется видом эквивалентного модулирующего воздействия, способ формирования которого положен в основу классификации ПЧ.

5. Определены оптимальные фазовые соотношения между выходными напряжениями однофазных инверторов переменного тока, участвующих в формировании однофазного или трехфазного квазисинусоидальной формы выходного напряжения НПЧ. Показано, что минимальное отличие  $M$  ступенчатой кривой, аппроксимирующей синусоиду, обеспечивается, если величина фазового сдвига между выходными напряжениями кратна дискретному углу  $f/(6N)$

6. Показано, что использование тиристорно-транзисторных ключей в высокочастотных преобразователях позволяет уменьшить динамические потери в силовых транзисторах и существенно повысить надежность работы преобразователей.

7. Показано, что НПЧ с КМ и СОК позволяют создавать автономные СЭС с высокими параметрами электрической энергии. Улучшение массо-габаритных показателей с одновременным улучшением параметров электрической энергии может быть достигнуто путем

системного проектирования, при котором генератор и ПЧ выполняются в виде интегрального машинно-полупроводникового блока.

8. Результаты теоретических исследований, принципы построения и структуры полупроводниковых преобразователей использованы при выполнении научно-исследовательской государственной работы. Испытание лабораторного образца преобразователя частоты подтвердили его работоспособность и высокие эксплуатационные показатели, что в полной мере показало эффективность практической реализации выводов и рекомендаций работы, технических средств и решений.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. Сенько В.И., Макдиси К. Способы построения преобразователей частоты на полностью управляемых ключах. - К.: Киев. политехн. ин-т. Рук. деп. в УкрИНТЭИ, № 137-Ук93, 1993, с.15.
2. Сенько В.И., Макдиси К. Анализ процессов в непосредственных транзисторных преобразователях частоты. - К.: Киев. политехн. ин-т. Рук. деп. в УкрИНТЭИ, № 136-Ук93, 1993, с.15.

с  
2/6

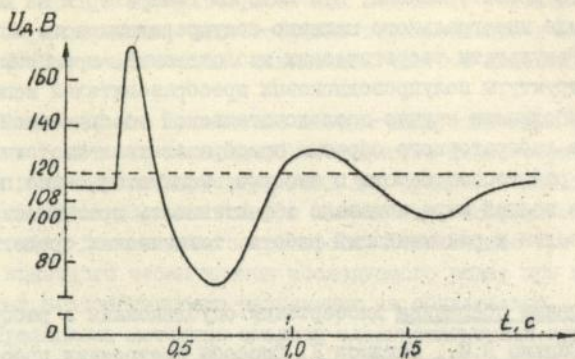


рис. 1.

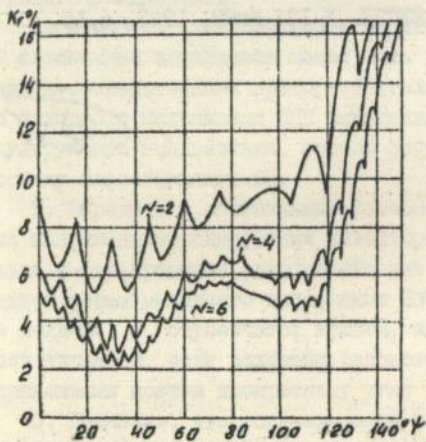


рис. 2.

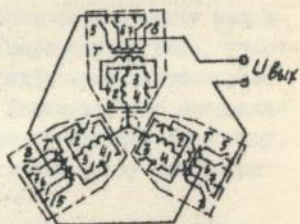


рис. 3.

ИИВ им. В. Стефанова  
АН БССР

Подписано в печать 14.05.93г формат 60x84/16  
Бумага писчая. Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 832

---

Отпечатано ЦУОП ГНПП "Плодвинконсерв" г. Киев, Сахсаганского, 1

1155657

AB 27.467  
**AB 27.467**