**Шушпанов Дмитрий Викторович. Высокоэффективные импульсные преобразователи напряжения с ШИМ и распределенные системы электропитания на их основе : Дис. ... канд. техн. наук : 05.12.04 СПб., 2005 244 с. РГБ ОД, 61:06-5/385**

**Федеральное агентство связи Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Санкт-Петербургский Государственный Университет Телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича Ш**4.200.6*1*9 **g** 9 **g -**

**ШУШПАНОВ ДМИТРИЙ ВИКТОРОВИЧ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НАПРЯЖЕНИЯ С ШИМ И РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ НА ИХ ОСНОВЕ**

**Специальность 05.12.04 - Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения**



**Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук**

**Научный руководитель - Заслуженный деятель науки РФ,**

**доктор технических наук, профессор В.Ф. Дмитриков**

**Научный консультант — кандидат технических наук,**

**И.Н. Самылин**

**Санкт-Петербург**

**2005**

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

стр

[**ВВЕДЕНИЕ б**](#bookmark3)

**I. ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ**

**ХАРАКТЕРИСТИК ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ**

**ПОНИЖАЮЩЁГО ТИПА** 23

1. [**Введение** 23](#bookmark5)
2. [**Математическая модель ИПН понижающего типа** 26](#bookmark6)
3. [**Импульсный преобразователь напряжения понижающего типа с однозвенными фильтрами** 35](#bookmark9)
4. Исследование устойчивости и коэффициента стабилизации с использованием частотных характеристик коэффициента петлевого усиления разомкнутой цепи ООС непрерывной линеаризованной модели ИПН 35
5. Исследование коэффициента подавления низкочастотных пульсаций с использованием импульсной модели ИПН 48
6. Исследование статических и динамических характеристик с использованием импульсной модели ИПН 53
7. **Оценка погрешности метода усреднения и линеаризации для импульсного преобразователя напряжения понижающего типа с обратной связью по выходному напряжению** 64
8. Постановка задачи 64
9. Метод введения источника гармонических колебаний в кольцо ООС стабилизатора 67
10. Описание методики измерения АЧХ и ФЧХ функции петлевого усиления 70
11. Расчет частотных характеристик ИПН понижающего типа методом замкнутого контура 71

з

1. **Исследование устойчивости работы двухтактных импульсных стабилизаторов с разделительным конденсатором в первичной обмотке трансформатора с использованием частотных характеристик** 84
2. Постановка задачи 84
3. Расчет частотных характеристик двухтактного стабилизатора87
4. [**Выводы** 98](#bookmark12)
5. [**ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ ПОВЫШАЮЩЕГО ТИПА** 102](#bookmark4)
6. **Математическая модель ИПН повышающего типа** 102
7. [**Исследование устойчивости и коэффициента стабилизации с использованием частотных характеристик непрерывной линеаризованной модели** 110](#bookmark22)
8. [**Исследование статических и динамических характеристик ИПН** 117](#bookmark23)
9. [**Выводы** 127](#bookmark24)
10. [**АНАЛИЗ ОДНОФАЗНОГО ИНВЕРТОРА НАПРЯЖЕНИЯ С СИНУСОИДАЛЬНОЙ ШИМ** 129](#bookmark25)
11. [**Постановка вопроса** 129](#bookmark26)
12. [**Анализ однофазного инвертора напряжения без ООС** 132](#bookmark27)
13. [**Особенность работы однофазного инвертора напряжения с ООС** 145](#bookmark30)
14. [**Выводы** 149](#bookmark32)
15. [**КОРРЕКТОРЫ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ** 151](#bookmark33)
16. [**Постановка задачи** 151](#bookmark34)
17. **Исследование активных корректоров коэффициента**

**мощности** 153

1. Обоснование алгоритма управления активным ККМ 153
2. Исследование динамических и качественных характеристик

[активных корректоров коэффициента мощности 157](#bookmark35)

1. [**Исследование пассивных корректоров коэффициента мощности** 173](#bookmark40)
2. **Выводы** 190
3. [**ОСОБЕННОСТЬ РАБОТЫ ИМПЛУЛЬСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ** 192](#bookmark42)
4. [**Актуальность темы исследования** 192](#bookmark43)
5. [**Комплексный коэффициент передачи системы каскадно­соединенных взаимодействующих подсистем (четырехполюсников)** 193](#bookmark44)
6. [**Постановка задачи исследования** 196](#bookmark48)
7. [**Комплексные входное и выходное сопротивления линеаризованной модели ИПН** 199](#bookmark49)
8. [**Анализ результатов расчета сопротивлений** 201](#bookmark53)
9. Проверка устойчивости системы входной фильтр - ИПН 206
10. Проверка устойчивости системы ИПН - ИПН 210
11. [**Выводы** 219](#bookmark55)
12. [**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ** 220](#bookmark56)

[**Выводы** 229](#bookmark57)

[**ЗАКЛЮЧЕНИЕ** 230](#bookmark58)

[**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ** 235](#bookmark59)

**ПЕРЕЧЕНЬ ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ**

АЧХ - амплитудно-частотная характеристика

ФЧХ - фазо-частотная характеристика

ИПН - импульсный преобразователь напряжения

ОС - обратная связь

ООС - отрицательная обратная связь

ШИМ - широтно-импульсная модуляция

СФ - сглаживающий фильтр

У11Т - усилитель постоянного тока

АНН - автономный инвертор напряжения

ККМ - корректор коэффициента мощности

ПККМ - пассивный корректор коэффициента мощности

РСП - распределенная система электропитания

б

**ВВЕДЕНИЕ**

**Актуальность темы.** Из основных тенденций развития радиоэлектронных средств (РЭС) и систем связи следует отметить с одной стороны всё возрастающую степень использования интегральных микросхем, микроконтроллеров и микропроцессоров, что приводит к резкому снижению массы и габаритов РЭС и её узлов; с другой стороны разработку и развитие новых принципов энерго- и ресурсосберегающих методов генерирования электрических колебаний, усиления информационных сигналов и преобразование электрической энергии в системах электропитания, которые являются неотъемлемой частью каждой РЭС.

Современные РЭС резко ужесточают требования к массогабаритным показателям, экономичности, надежности, качеству вырабатываемой энергии и электромагнитной совместимости систем электропитания. Решение проблем энерго- и ресурсосбережений в устройствах электропитания (преобразователях переменного напряжения в постоянное - AC/DC; постоянного напряжения одного уровня в постоянное напряжение другого уровня - DC/DC; постоянного напряжения в переменное - инверторы DC/AC) осуществляется с использованием импульсных (ключевых) режимов работы усилительных приборов в преобразователях напряжения с промежуточным звеном высокой частоты (сотни килогерц - единицы мегагерц) современной элементной базы: мощных транзисторов (MOSFET, IGBT), мощных ультрабыстрых диодов, современных магнитных материалов и конденсаторов и современных технологий узлов и устройств (низкопрофильные, безнамоточные, плоские трансформаторы; поверхностный монтаж и др.). Ключевые режимы работы усилительных приборов позволяют приблизить электронный КПД устройств к предельно достижимому (100%) путем снижения мощности потерь в усилительных приборах, тем самым увеличить надежность работы импульсного источника питания (ИП); уменьшить массу и габариты ИП путем снижения или полного устранения системы охлаждения усилительных приборов.

Преобразование энергии не на промышленной частоте (50 Гц), а на высокой частоте (сотни килогерц - единицы мегагерц) позволяет в десятки - сотни раз снизить объем и массу реактивных фильтрующих устройств и согласующих трансформаторов, которые даже в современных импульсных ИП занимают до 50-70% габаритов и веса всей системы. Повышение частоты преобразования электрической энергии, определяемое частотой переключения транзисторов, в импульсных высокочастотных преобразователях напряжения (ВПН) требует соответствующего режима переключения транзисторов. Это обусловлено тем, что на частотах коммутации десятки — сотни килогерц и выше всё более проявляется неидеальность ключевых свойств полупроводниковых приборов, что вызывает рост коммутационных потерь. Наличие паразитных емкостей и индуктивностей полупроводниковых приборов и монтажа, создающих паразитные высокочастотные контура, приводит к возникновению перенапряжений и высокочастотных колебаний при коммутации полупроводниковых приборов. Таким образом, применение импульсных ВПН, наряду с уменьшением массы и габаритов ИП, приводит к увеличению уровня электромагнитных помех (ЭМП), усугубляя (и без того сложную в современных условиях насыщенности радиоэлектронными средствами различных сфер деятельности человека) электромагнитную обстановку [1 - 4]. Однако экономия стали, меди, электроэнергии, повышение надежности, быстродействия и т.д. настолько значительны, что импульсные ВПН применяются всё шире, частота преобразования электроэнергии продолжает увеличиваться. Но в то же время проблема устранения ЭМП, создаваемых ВПН, проблема снижения в них коммутационных потерь становится актуальной.

Из существующих в настоящее время методов снижения ЭМП путем уменьшения или полного устранения ВЧ колебаний и снижения коммутационных потерь в транзисторах при их переключении [5 — 13] можно выделить (рис. В.1):

- применение демпфирующих RCD или LCD цепей;

* использование резонансных ВПН с последовательным или параллельным резонансным контуром (РК);

впн

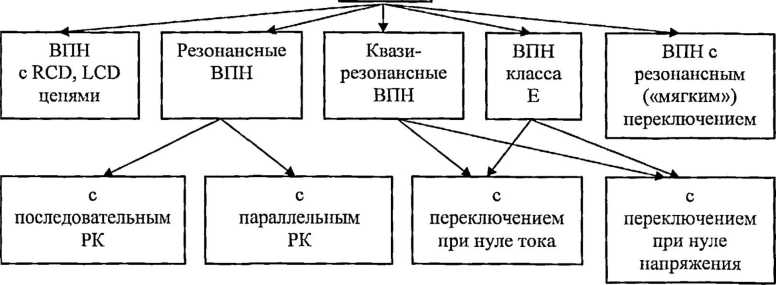


Рис. В. 1. Классификация высокочастотных преобразователей напряжения с резонансными контурами

* применение квазирезонансных ВПН или ВПН класса Е с переключением транзисторов при нуле тока или нуле напряжения;
* использование ВПН с резонансным или «мягким» переключением.

Снижение ЭМП и коммутационных потерь путем демпфирования ВЧ

колебаний и формирования траектории рабочей точки силовых транзисторов на ВЧ неэффективно как с помощью RCD, так и LCD-цепей. Применение RCD цепей для демпфирования ВЧ-колебаний в ВПН при коммутации транзисторов обеспечивается путем снижения постоянной времени RCD цепи, т.е. заданной паразитной емкости транзистора снижением сопротивления резистора RCD цепи. Но при этом происходит дополнительная большая загрузка транзисторов разрядным током конденсатора, увеличение мощности потерь в резисторе [13].

При использовании реактивных LCD-цепей увеличивается амплитуда тока и напряжения на силовом транзисторе, что снижает коэффициент использования его по мощности. Повышение реактивной мощности при использовании LCD цепей сопровождается дополнительными потерями в активных элементах схемы. Основной недостаток применения LCD цепей на высоких частотах коммутации заключается в том, что частота коммутации

транзисторов должна быть значительно ниже резонансной частоты демпфирующего LC-контура для обеспечения работы ВПН в режиме ШИМ.

Несмотря на появление современных мощных МДП-транзисторов, частота переключения которых ограничивается несколькими десятками мегагерц, в ВПН, использующих экономичный режим ШИМ, который характеризуется наибольшим коэффициентом использования

полупроводниковых приборов и остальных элементов импульсного ИП по мощности, частота преобразования электромагнитной энергии ИП будет значительно ниже из-за резкого увеличения коммутационных потерь и ЭМП. Кроме того, при выключении транзистора на паразитных индуктивностях, индуктивностях рассеивания транзистора возникают большие выбросы напряжения, возникающие из-за резкого изменения тока (большого *dijdt),* которые прикладываются к транзистору и вывязывают большой уровень ЭМП. При ВЧ и значительном напряжении питания в транзисторе будет рассеиваться большая мощность потерь при включении *Рп =(ClvUy2)t,* где СТР -

паразитная выходная емкость транзистора, а возникающие сильные импульсные помехи, проникая через проходную емкость (эффект Миллера) в предоконечный каскад, могут вывести его из строя или нарушить устойчивость его работы.

Резонансные ВПН являются преобразователями двухтактного типа, в которых используется дополнительные резонансные контура (РК), которые работают в течение всего периода переключения, поэтому их установленная мощность значительно больше установленной мощности реактивных элементов демпфирующих цепей ВПН с ШИМ [9, 11 - 14]. Наличие дополнительных РК приводит к значительному увеличению токов через полупроводниковые приборы и повышению в них статических потерь. Регулирование или стабилизация выходного напряжения таких преобразователей осуществляется изменением частоты коммутации транзисторов выше или ниже резонансной частоты РК.

Квазирезонансные ВПН являются преобразователями однотактного типа, они, как и резонансные ВПН, имеют дополнительные РК. Квазирезонансные преобразователи характеризуются однонаправленной передачей энергии в нагрузку, аналогично традиционным преобразователям с ШИМ. Регулирование или стабилизация выходного напряжения осуществляется изменением длительности импульсам в ВПН с переключением в нуле напряжения [15, 16]. При этом происходит изменение частоты переключения транзистора, поскольку интервал времени, в течение которого происходит колебательный процесс в РК, практически постоянен. В квазирезонансных преобразователях, являющихся однотактными преобразователями, имеют место значительные перенапряжения на полупроводниковых приборах, превышающее напряжение питания в 5-10 раз, что исключает их использование при высоких напряжениях питания. Таким образом, недостатком квазирезонансных ВПН является существенно более низкий коэффициент использования транзисторов и диодов по мощности по сравнению с традиционными ВПН с ШИМ.

ВПН класса Е имеют РК как минимум третьего порядка. Установленная мощность полупроводниковых приборов и реактивных элементов РК в ВПН класса Е больше, чем у резонансных ВПН, поэтому область их применения весьма ограничена.

Преобразователи напряжения, в которых РК работает только во время переключения транзисторов, называется ВПН с резонансным («мягким») переключением, а коммутация транзисторов происходит при нуле напряжения [6,17-23]. Также преобразователи позволяют сочетать низкие потери мощности при переключении транзисторов, характерные для резонансных и квазирезонансных структур, с экономичностью процесса передачи мощности преобразователей с ШИМ, поскольку в данном случае колебания напряжения и тока во время передачи мощности в нагрузку имеют прямоугольную форму. Так как время действия РК ограничено временами фронта тока и напряжения, то реактивная мощность их элементов невелика. Роль РК часто играют индуктивность рассеяния или намагничивания трансформатора совместно с выходной емкостью транзистора. В таких ВПН мощность коммутационных потерь, устраненная из транзистора, в отличие от использования демпфирующих RCD или LCD цепей, рекуперируется в источник питания. В данных преобразователях паразитные параметры элементов используются для снижения коммутационных потерь и ЭМП при переключении транзисторов.

ВПН с резонансным («мягким») переключением при использовании МДП-транзисторов работают с частотой переключения 100 -г- 500 кГц. В этом диапазоне частот достигается оптимальное соотношение между массой, габаритами, КПД, надежностью преобразователей и существенно снижается уровень ЭМП.

Таким образом, ВПН, использующие ШИМ с «мягким» (резонансным) переключением транзисторов, совмещают высокий коэффициент использования полупроводниковых и других элементов схемы по мощности с низкими коммутационными потерями и достаточными низким уровнем ЭМП., Они представляются наиболее перспективными для использования в импульсных источниках питания.

Всё более жесткие требования, предъявляемые современными РЭС к качеству вырабатываемой электроэнергии: стабилизация выходного

напряжения под действием различных возмущающих воздействий до 60 дБ и более; величина низкочастотных и высокочастотных пульсаций выходного напряжения десятки-единицы милливольт, что при выходном напряжении десятки-сотни вольт приводит к необходимости обеспечения коэффициента фильтрации 60-80 дБ; малая величина перерегулирования (1-2%) при скачкообразном изменении входного напряжения и сопротивления нагрузки в больших пределах; необходимость обеспечения больших запасов устойчивости по фазе и амплитуде, приводят к необходимости исследования новых принципов построения и развития методов анализа и синтеза импульсных источников питания с глубокой отрицательной многоконтурной обратной связью (ООС).

Для стабилизации выходных параметров импульсных ИП с ООС, являющихся дискретно-нелинейными устройствами, обычно используются ООС по выходному напряжению или току, а для обеспечения необходимых запасов устойчивости по амплитуде и фазе, малой величины перерегулирования по напряжению и току при действии различных дестабилизирующих факторов, необходимой полосы частот АЧХ разомкнутой петли ООС для подавления НЧ пульсаций необходимо использовать многоконтурные ООС по различным переменным состояния [24 - 32].

Для исследования стабилизации и устойчивости данных систем используется метод усреднения и линеаризации, который позволяет перейти от дискретной нелинейной системы к непрерывной линейной, получить частотную передаточную функцию коэффициента петлевого усиления разомкнутой петли ООС и с использованием характеристик Боде или частотных критериев определить устойчивость системы, коэффициент стабилизации выходных параметров, полосу частот АЧХ разомкнутой петли ООС, в которой обеспечивается требуемое подавление низкочастотных пульсаций за счет ООС.

Метод усреднения и линеаризации является приближенным. Погрешность возникает как на этапе усреднения, т.е. замене дифференциальных уравнений, описывающих переменные состояния системы на различных этапах работы импульсного преобразователя напряжения (ИПН) одним дифференциальным уравнением, так и при линеаризации полученного непрерывного нелинейного дифференциального уравнения. Погрешность метода усреднения и линеаризации ИГІН с ШИМ в литературе не рассматривалась.

Специалистами по силовой электронике и преобразовательной технике до сих пор не используется глубоко разработанная теория синтеза реактивных LC- фильтров: не рассматриваются фильтры Чебышева с равноволновыми характеристиками в полосе пропускания, которые обладают максимальным затуханием в полосе задерживания при заданном количестве элементов и заданном произведении где *L% и С-£ -* суммарные значения

индуктивностей и емкостей фильтров; не рассматриваются фильтры

Баттерворта с максимально плоскими характеристиками в полосе пропускания и линейными фазовыми характеристиками в полосе задерживания.

Таким образом, необходимо провести исследование реализации максимально возможного коэффициента стабилизации выходных параметров; запасов устойчивости по амплитуде и фазе; минимальной величины перерегулирования выходного напряжения при действии различных дестабилизирующих факторов; максимальной полосы частот АЧХ разомкнутой петли ООС, в которой обеспечивается требуемое подавление низкочастотных пульсаций для импульсных преобразователей напряжения с ШИМ понижающего и повышающего типов, использующих сглаживающие фильтры с характеристиками Чебышева и Баттерворта, с различными контурами ООС, при различной величине пульсаций выходного напряжения, различных типах и параметрах комплексной нагрузки. Оценить погрешность анализа и синтеза ИПН с ШИМ с ООС, представляющих дискретно-нелинейные системы с ООС, при использовании метода усреднения и линеаризации.

В состав современных систем электропитания, как отмечалось, входят ИПН, преобразующее переменное напряжение в постоянное (AC/DC), постоянное напряжение одного уровня в постоянное напряжение другого уровня (DC/DC), а также постоянное напряжение в переменное — инверторы (DC/AC). Качество энергии, вырабатываемое инверторами промышленной частоты (50 Гц), должно удовлетворять ГОСТу или отраслевым стандартам при работе инвертора на линейную комплексную нагрузку, нелинейную (выпрямитель с емкостным или LC-фильтром) нагрузку и при работе инвертора в режиме холостого хода. Качество выходного синусоидального напряжения частотой 50 Гц определяется значением коэффициента гармоник и спектральным составом. Известные в литературе [33 - 35] однофазные инверторы напряжения, реализуемые, как правило, по схеме класса BD (одноуровневое однополярное напряжение на входе СФ) даже при использовании громоздких фильтров не обеспечивают значение коэффициента

гармоник *(Кг < 5* %), удовлетворяющее ряду отраслевых ГОСТов в режиме холостого хода.

Поэтому актуальной является проблема разработки однофазного инвертора промышленной частоты, обеспечивающего требуемое качество выходного напряжения и минимальные габариты СФ при работе инвертора на линейную, нелинейную нагрузки и в режиме холостого хода.

При использовании импульсных источников, преобразующих переменное напряжение сети в постоянное напряжение или в переменное напряжение другой частоты, возникают нелинейные искажения тока и импульсные помехи в сети. Отрицательное действие этих искажений проявляется с одной стороны, на функционирующие РЭС, а с другой стороны на электросеть. При импульсном потреблении тока импульсными источниками возникающие гармонические составляющие тока не совпадают по фазе с напряжением сети и протекают в нейтральном проводе. Обычно сечение нейтрального провода много меньше сечения фазовых проводов, поэтому гармонические составляющие тока, достигая критического значения, могут привести к пожару электросети. Для устранения негативного влияния импульсных источников на сеть Международная электрическая компания (МЭК) и Европейская организация по стандартизации в электротехнике (CENTELEC) приняли стандарты IEC555, устанавливающие ограничение на содержание гармоник, косинус фи (coscp) и коэффициент мощности импульсных источников. Коэффициент мощности *Км* определяется как отношение активной мощности, передаваемой источником потребителю, к кажущейся (полной) мощности, преобразуемой источником. В соответствии с принятым стандартом IEC555 норма *K\i* вновь разрабатываемой аппаратуры должна быть не ниже 0,98. Для сравнения в импульсных выпрямителях с емкостным фильтром *Км* = 0,66. Эффективный метод реализации данного *Км -* применение корректоров коэффициента мощности (ККМ) на входе любого импульсного преобразователя. Основной стандарт EN61000-3 устанавливает также соотношение гармонических составляющих потребляемого из сети тока со

второй по сороковую гармоники. Эти ограничения на коэффициент мощности и гармонические составляющие тока импульсных источников распространяются на все разрабатываемые устройства мощностью свыше 75 Вт с января 2001 г. и в России.

Анализ процессов в ККМ на основе преобразователя повышающего типа, расчет *Км, Кг,* coscp, гармонических составляющих проводился в [36 - 39] при работе ККМ на резистивную нагрузку. Однако ККМ, как правило, работает не на резистивную нагрузку, а на импульсные преобразователи напряжения повышающего или понижающего типа, имеющие комплексное выходное сопротивление и отрицательную активную составляющую сопротивления по переменному току. Поэтому режим работы ККМ и его характеристики могут отличаться при работе на резистивную нагрузку от режима работы ККМ на импульсные преобразователи повышающего или понижающего типа.

Кроме активных ККМ используются также пассивные корректоры коэффициента мощности (ПККМ), которые имеют существенно худшие массогабаритные показатели по сравнению с активными ККМ, но они не имеют высокочастотных составляющих входного тока (гармоник с тактовой частотой коммутации транзисторов). В этом их принципиальное преимущество перед активными ККМ, что позволяет высокоэффективные импульсные источники питания с ПККМ использовать в измерительной, медицинской аппаратуре, в малошумящих усилителях, в усилителях с высоким коэффициентом усиления и т.д., где обычные импульсные устройства и активные ККМ не применяются из- за ухудшения электромагнитной совместимости с чувствительными РЭС. Анализ ПККМ также проводился при работе на резистивную нагрузку, что совершенно не отражает реальных процессов и характеристик ПККМ при их работе на импульсные источники питания.

**Цель и основные задачи работы.** Целью работы является решение проблем улучшения динамических, статических, массогабаритных

характеристик и качественных показателей импульсных источников вторичного электропитания с ШИМ, включающих: преобразователей переменного напряжения в постоянное (AC/DC); постоянного напряжения одного уровня в постоянное напряжение другого уровня (DC/DC); постоянного напряжения в переменное (DC/AC); корректоры коэффициента мощности, а также распределенные системы питания на их основе и обеспечение их электромагнитной совместимости с промышленной сетью в соответствии с новыми международными IEC555 и Российскими стандартами. Данная проблема решалась путем комплексного подхода, т.е. путем разработки и исследования структуры и параметров ИПН типа AC/DC и DC/DC с наилучшими динамическими и статическими характеристиками, DC/AC с качественными показателями выходного напряжения, удовлетворяющими требованием ГОСТ при работе на комплексную линейную, нелинейную (выпрямитель с емкостным или LC-фильтром) нагрузки и в режиме холостого хода, и минимальной массой и габаритами выходного СФ; исследования и разработки активных и пассивных ККМ, обеспечивающих требуемые ГОСТом коэффициент мощности и спектральный состав входного тока при работе ККМ на различные импульсные ИП с ШИМ, и, наконец, исследование устойчивости децентрализованной (распределенной) системы питания, содержащей импульсные источники питания с ШИМ, которые имеют комплексные выходное и входное сопротивления с отрицательной активной составляющей по переменному току.

Для достижения этой цели в диссертации решаются следующие основные задачи:

1. Исследование устойчивости, динамических характеристик, максимальной величины коэффициента стабилизации выходного напряжения и коэффициента ослабления низкочастотных пульсаций выходного напряжения ИПН с ШИМ понижающего и повышающего типов с многоконтурными ООС, представляющих собой нелинейные дискретные устройства.
2. Исследование и разработка однофазного инвертора промышленной частоты, обеспечивающего требуемые ГОСТом качественные показатели выходного напряжения при работе инвертора на комплексную линейную, нелинейную нагрузки и в режиме холостого хода при минимальных массе и габаритах СФ.
3. Исследование принципов построения, структур, параметров и алгоритмов управления активных и пассивных ККМ, обеспечивающих требуемые ГОСТом коэффициент мощности, спектральный состав входного тока ККМ при их работе на импульсные стабилизированные преобразователи напряжения и регуляторы напряжения.
4. Разработка методики исследования и исследование устойчивости работы децентрализованных (распределенных) систем питания, использующих ИПНсШИМ.

**Основные методы исследования.** Теоретические исследования базируются на использовании фундаментальных положений теории электрических цепей, в частности, современного синтеза электрических цепей, теории нелинейных дискретных систем.

**Научная новизна и основные положения, выносимые на защиту.** В работе получены новые результаты:

* в исследовании динамических и статических характеристик, устойчивости, максимальной величины стабилизации и коэффициента ослабления низкочастотных пульсаций выходного напряжения за счет ООС в высокочастотных ИПН AC/DC и DC/DC понижающего и повышающего типов с однозвенными фильтрами с равноволновыми характеристиками Чебышева и максимально плоскими характеристиками Батгерворта, различными контурами обратной связи, различным ослаблением фильтров, с различными коэффициентами усиления УПТ в цепи ООС, на основании которых разработаны импульсные ИП мощностью 300 Вт и 500 Вт с напряжением питания 500 В, со стабилизацией выходного напряжения 60 дБ, перерегулированием по напряжению 2%, при запасе по фазе Дер = 70°;
* в разработке и исследовании однофазного инвертора промышленной частоты, в результате которого разработан отечественный инвертор промышленной частоты мощностью 300 Вт с напряжением питания 350 В с коэффициентом гармоник *Кг* < 2% без использования ООС при работе на комплексную линейную, нелинейную нагрузки и в режиме холостого хода с массогабаритными показателями на порядок лучшими по сравнению с отечественными аналогами;
* в исследовании принципов построения, структур, параметров и алгоритмов управления активными и пассивными ККМ, которые обеспечивают *Кы* = 0,997 и спектральный состав входного тока, удовлетворяющих требованиям ГОСТ не только при работе на резистивную нагрузку, но и на ИПН с ШИМ;
* в исследовании устойчивости распределенных систем питания, построенных на основе ИПН с ШИМ.

На основе проведенных исследований решена важная научно-техническая проблема - созданы импульсные преобразователи напряжения с ШИМ и децентрализованные системы питания на их основе с улучшенными динамическими и массогабаритными характеристиками, удовлетворяющие современным требованиям по коэффициенту мощности и спектральному составу входного тока в сети.

**В** диссертационной работе защищаются следующие основные **научные положения:**

1. Полученные передаточные функции коэффициента усиления разомкнутой петли ООС ИПН понижающего и повышающего типов, представляющих собой нелинейное дискретное устройство с многоконтурными ООС, как суммы соответствующих передаточных функций со своими ОС при условии, что в ИПН используется один ШИМ-компаратор и через него замыкаются пути обхода всех контуров ОС. Полученные передаточные функции позволяют определить коэффициент стабилизации выходного напряжения, запас устойчивости по амплитуде и фазе, полосу частот АЧХ, обеспечивающую подавление низкочастотных пульсаций за счет ООС.
2. Доказанное положение, что для существенного увеличения коэффициента стабилизации и запаса устойчивости по фазе и амплитуде для

ИПН понижающего типа с однозвенным СФ следует использовать два контура ОС по выходному напряжению и току конденсатора. При этом обеспечивается существенное увеличение запаса устойчивости по фазе до Лф = 60° при = -Яном и до Лф = 30° при *RH = RXx* Для фильтра Баттерворта при стабилизации выходного напряжения 60 -і- 70 дБ и Дф = 70° при J?H = -Яном и Дф = 47° при *Rn* = *Rxx* Для фильтра Чебышева. При одноконтурной ОС по выходному напряжению запас устойчивости при номинальной нагрузке і?н = і?ном не превышает 20°, а в режиме холостого хода *Rn = Rxx* Дф <10°.

1. Доказанная идентичность частотных характеристик петлевого усиления цепи ООС двухтактных ИПН мостового и полумостового типов с разделительным конденсатором в первичной обмотке трансформатора и без конденсатора, которая позволяет при синтезе цепей ООС, выборе типа фильтра воспользоваться полученными в работе результатами для однотактного ИПН понижающего типа для синтеза цепей ООС и СФ также и для двухтактных ИПН с разделительным конденсатором в первичной обмотке трансформатора.
2. Проведенные исследования погрешности расчета частотных характеристик коэффициента петлевого усиления разомкнутого контура ООС ИПН с ШИМ с использованием метода усреднения и линеаризации, позволяющие определить реальные запасы устойчивости по амплитуде и фазе, коэффициент стабилизации, полосу частот АЧХ и повысить точность синтеза цепей ООС и выходного фильтра ИПН, являющихся дискретно-нелинейными устройствами, при замене их эквивалентными линейными системами.
3. Найденная структура ОС, тип и параметры выходного СФ ИПН, при которых величина перерегулирования на всех элементах ИПН не превышает 2% при всех режимах работы при коэффициенте стабилизации 60 дБ и запасе устойчивости по фазе Дф = 70°.
4. Полученный результат, что при совокупности динамических и статических характеристик, устойчивости работы, массогабаритным показателям предпочтение следует отдать ИПН с однозвенным чебышевским фильтром и двухконтурной ОС по выходному напряжению и току конденсатора фильтра.
5. Показанная возможность увеличения коэффициента стабилизации свыше 40 дБ при запасе устойчивости по фазе больше 60° для ИПН повышающего типа, передаточная функция петлевого усиления ООС которого содержит неминимально-фазовое звено, нуль которого лежит в правой полуплоскости комплексной переменной, при использовании инерционного звена коррекции в контуре ОС по выходному напряжению. Без найденных цепей коррекции коэффициент стабилизации не достигает и 25 дБ.
6. Проведенные исследования инвертора промышленной частоты и предложенная методика расчета выходного фильтра, которые позволили не только получить коэффициент гармоник выходного напряжения *(Кг < 2%)* в режиме холостого хода, удовлетворяющий требованиям ГОСТ, но и на порядок снизить индуктивность дросселя и емкость конденсатора выходного фильтра по сравнению с выходными фильтрами известных в литературе аналогов.
7. Проведенные исследования различных принципов построения и алгоритмов управления, а также различных структур активных и пассивных корректоров коэффициента мощности ККМ. Проведенные исследования коэффициента мощности *Км,* коэффициента гармоник *Кг,* coscp, которые позволили определить оптимальные значения постоянной времени Тн = *CARyi* и характеристическое сопротивление р активного ККМ, выполненного по схеме ИПН повышающего типа, при которых *Км* = 1, *Кг —* 2%. Доказанные положения, что для активного ККМ характер изменения и значения *Км, Кг,* coscp при работе на резистивную нагрузку и на ИСН практически одинаковы. Найденная структура пассивного ККМ, обеспечивающая *Км,* удовлетворяющий ГОСТ. Найденные условия возникновения нерабочих режимов в активных и пассивных ККМ и методы их устранения.
8. Проведенные исследования устойчивости децентрализованной (распределенной) системы питания на основе ИПН с ШИМ, использующие частотные характеристики комплексного выходного сопротивления «ведущего» ИПН (генератор) и комплексного входного сопротивления «ведомых» ИПН (потребители) и результаты этих исследований.

**Практическая ценность работы** заключается в том, что проведенные исследования послужили основой для разработки ИПН с ШИМ типа AC/DC мощностью 300 Вт, напряжением питания 500 В, нестабильностью выходного напряжения 60 дБ и перерегулированием выходного напряжения при скачкообразном изменении сопротивления нагрузки в пределах ±30% не более *2%,* а также инвертора промышленной частоты, позволившего не только обеспечить *Кг < 2%* при работе на комплексную линейную, нелинейную нагрузки и в режиме холостого хода, а также на порядок улучшены массогабаритные показатели выходного фильтра по сравнению с фильтрами отечественных аналогов.

Основные научные положения диссертации служат методической базой для создания специального курса по теории электрических цепей, а также для дипломного проектирования на кафедре ТЭЦ.

**Внедрение результатов диссертационной работы.** Теоретические и практические результаты диссертации использовались в научно- исследовательских работах, проводимых на кафедре ТЭЦ СПбГУТ по гранту СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича «Разработка программно-аппаратного комплекса для автоматизированного измерителя частотных характеристик нелинейных импульсных преобразователей и систем электропитания, включающих цепи с распределенными параметрами для модернизации учебно­лабораторной базы кафедр ТЭЦ и «Линии связи» и хоздоговору с ФГУП «НТЦ «Радиосвязь, радиовещание и телевидение».

Результаты исследований устойчивости работы ИПН и результаты исследований методов улучшения динамических характеристик внедрены в ИПН переменного напряжения в постоянное напряжение мощностью 300 Вт, с выпрямленным входным напряжением 500 В, выходным напряжением 350 В и в инверторе напряжения промышленной частоты мощностью 300 Вт.

**Апробация работы.** Основные результаты работы обсуждались на научных семинарах кафедры ТЭЦ СПбГУТ, научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава СПбГУТ им. проф. **М.А.** Бонч- Бруевича, а также 4-й и 6-й всероссийских конференциях «Состояние и перспективы развития энергетики связи».

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ, в том числе 8 статей и 3 научных доклада.

**Структура и объем диссертации.** Работа состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы, включающего 99 наименований. Диссертация содержит 111 страниц текста, 120 рисунков и 29 таблиц.

**Выводы**

Экспериментальные исследования ИНП (AC/DC и DC/DC), работающего на инвертор промышленной частоты, подтвердили: справедливость полученных теоретических исследований устойчивости работы ИПН как нелинейного устройства с отрицательной обратной связью, стабильности выходных характеристик и результаты исследований динамических характеристик, т.е. перерегулирования по выходному напряжению и току через транзисторы и диоды при скачкообразном изменении сопротивлении нагрузки и входного напряжения.

Экспериментальные исследования инвертора промышленной частоты (DC/AC) подтвердили: справедливость теоретических расчетов коэффициента гармоник выходного напряжения при работе инвертора на комплексную линейную, нелинейную (выпрямитель с емкостным фильтром) нагрузки и в режиме холостого хода и расчета сглаживающего LC-фильтра.

Проведенные экспериментальные исследования подтверждают правильность основных теоретических положений об устойчивости системы, включающей ведущий преобразователь (AC/DC и DC/DC) и ведомый ИПН (инвертор).

Полученные характеристики разработанных систем вторичного электропитания, в которых используются ИПН с ТІТИМ AC/DC, DC/DC и инвертор промышленной частоты, подтвердили перспективность таких систем электропитания.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Диссертационная работа направлена на решение проблемы улучшения динамических, статических, массогабаритных характеристик и качественных показателей импульсных источников вторичного электропитания с ШИМ, включающих: преобразователи переменного напряжения в постоянное

(AC/DC); постоянного напряжения одного уровня в постоянное напряжение другого уровня (DC/DC); постоянного напряжения в переменное - инверторы (DC/AC); активные и пассивные корректоры коэффициента мощности, а также децентрализованные (распределенные) системы питания на их основе и обес­печение их электромагнитной совместимости с промышленной сетью в соот­ветствии с новыми международными и Российскими стандартами путем ком­плексного подхода:

* к исследованию и определению ИПН с ШИМ AC/DC и DC/DC пони­жающего и повышающего типов с многоконтурными ООС, представляющих собой нелинейные дискретные устройства с улучшенными динамическими, статическими и массогабаритными характеристиками, максимальной величи­ной коэффициента стабилизации;
* к исследованию однофазного инвертора промышленной частоты, обеспе­чивающего требуемые ГОСТом качественные показатели выходного напряже­ния при работе инвертора на комплексную линейную, нелинейную (выпрями­тель с емкостным или LC-фильтром) и в режиме холостого хода при мини­мальных массе и габаритах СФ;
* к исследованию принципов построения, алгоритмов управления, опреде­лению структур и оптимальных режимов работы активных и пассивных кор­ректоров коэффициентов мощности, обеспечивающих требуемые ГОСТом коэффициент мощности, спектральный состав входного тока ККМ при их работе на импульсные стабилизированные преобразователи напряжения с ШИМ и регуляторы напряжения;

- к разработке методики исследования децентрализованных (распределен­ных) систем питания, использующих ИПН с ШИМ.

Основные научные и практические результаты выполненных исследова­ний заключаются в следующем:

1. Получены новые результаты в исследовании динамических, статиче­ских характеристик, максимального коэффициента стабилизации выходного напряжения, коэффициента ослабления низкочастотных пульсаций за счет ООС в ВПН AC/DC и DC/DC понижающего и повышающего типов с одно­звенными фильтрами с равноволновыми характеристиками Чебышева и мак­симально плоскими характеристиками Баттерворта, различными ослаблением фильтров, различными коэффициентами усиления УПТ в цепи ООС и различ­ными контурами ОС и корректирующими звеньями. На основании проведен­ных исследований разработаны импульсные ИП понижающего типа со стаби­лизацией выходного напряжения 60 дБ, перерегулированием выходного на­пряжения 2% при запасе по фазе Лф = 70° при скачкообразном изменении на­грузки в пределах ±50% и входного напряжения ±25%.
2. Доказано, что для существенного увеличения коэффициента стаби­лизации и- запаса устойчивости по фазе и амплитуде для ИГІН DC/DC пони­жающего типа с однозвенным СФ следует использовать два контура ОС по вы­ходному напряжению и току конденсатора СФ. При этом обеспечивается уве­личение запаса устойчивости по фазе до Дф = 60° при номинальном сопротив­лении нагрузки *Ru* = Дном и до Дф = 30° при холостом ходе *RH* = *RXx* Для фильтра Баттерворта при стабилизации выходного напряжения 60 -\*■ 70 дБ и Дф = 70° при Ли = Дном, Дф = 47° при *RH* = *RXx* при *К*ст = 60 70 дБ для фильтра

Чебышева. При одноконтурной ОС по выходному напряжению запас устойчи­вости при номинальной нагрузке не превышает Дф = 20°, а в режиме холостого хода-Дф < 10°.

1. Доказана идентичность частотных характеристик коэффициента пе­редачи петлевого усиления разомкнутой цепи ООС двухтактных ИПН мостово- го и полумостового типов с разделительным конденсатором в первичной об­мотке трансформатора и без конденсатора. Это позволяет воспользоваться по­лученными в работе результатами для однотактного ИПН понижающего типа для синтеза цепей ОС и выходных фильтров также и для двухтактных ИПН с разделительным конденсатором в первичной обмотке трансформатора.
2. Проведены исследования погрешности расчета частотных характе­ристик коэффициента петлевого усиления разомкнутого контура ООС ИПН с ШИМ, являющегося дискретно-нелинейным устройством, с использованием метода усреднения и линеаризации. Проведенные исследования погрешности позволили определить реальные запасы устойчивости по амплитуде и фазе, ре­альные коэффициент стабилизации и полосу частот АЧХ, повысить точность синтеза цепей ООС и выходных фильтров при замене ИПН с ШИМ эквива­лентными линейными системами.
3. Показано, что по массогабаритным показателям, статическим и ди­намическим характеристикам предпочтение следует отдать ИПН с однозвен­ным чебышевским фильтром и двухконтурной ООС по выходному напряже­нию и току конденсатора фильтра.
4. Выбран тип инвертора промышленной частоты (ИПН DC/AC) и предложена методика расчета выходного фильтра, которые позволили не толь­ко получить коэффициент гармоник (*Кг* < 2%) выходного напряжения при ра­боте инвертора как на комплексную линейную и нелинейную нагрузки, но и в режиме холостого хода и при этом на порядок снизить индуктивность дросселя и емкость конденсатора выходного фильтра по сравнению с выходными фильт­рами известных аналогов.
5. Проведено исследование различных принципов построения, алго­ритмов управления и структур активных и пассивных корректоров коэффици­ента мощности ККМ. Проведенные исследования коэффициента мощности *Км* позволили определить оптимальные значения постоянной времени *х — СК\\* и характеристического сопротивления р активного ККМ, при которых *Км* = 1, *Кг* = 2%. Показано, что для активного ККМ характер изменения и значения *Км* при работе на резистивную нагрузку и на ИСН практически одинаковы. Опре­делена единственная структура пассивного ККМ, которая обеспечивает *Км,* удовлетворяющий ГОСТ, при работе на ИПН с ШИМ. Найдены условия воз­никновения нерабочих режимов в активных и пассивных ККМ и методы их устранения.
6. Проведены исследования устойчивости децентрализованной (рас­пределенной) системы питания, построенной на основе ИПН с ШИМ. Показа­но, что устойчивость всей системы питания зависит от входных и выходных комплексных сопротивлений отдельных подсистем: выходного сопротивления «ведущего» ИПН - генератора и входного сопротивления «ведомых» ИПН - потребителей. Предложены методики измерения этих сопротивлений в рабо­чем режиме ИПН, когда учитываются все «паразитные» параметры и «паразит­ные» связи в ИПН.
7. Экспериментальное исследования ИПН с ШИМ в составе: преобра­зователя напряжения одного уровня 500 В (трехфазная сеть) в другой уровень 350 В (преобразователь AC/DC); преобразователя напряжения питания 320 - 175 В (аккумуляторная батарея) в напряжение 350 В (преобразователь DC/DC); инвертора промышленной частоты с частотой 50 Гц, 220 В (преобразователь DC/AC) с напряжением питания 350 В, работающих в распределенной системе преобразователь AC/DC понижающего типа - инвертор и преобразователь DC/DC понижающего типа - инвертор, используемый в аппаратуре, созданной ФГУП «НТЦ «Радиосвязь, радиовещание и телевидение» совместно с СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича подтвердили справедливость:

* полученных результатов исследования устойчивости работы ИПН с ШИМ AC/DC и DC/DC понижающего типа, их динамических и статических характеристик;
* проведенных исследований однофазного инвертора промышленной час­тоты;

- результатов исследований децентрализованных систем питания.

10. Создание источников питания и децентрализованной системы пита­ния, в которых используются исследованные ИПН с ШИМ AC/DC, DC/DC и инвертор промышленной частоты с найденными структурой и параметрами контуров ОС, выходными фильтрами и их сравнение с отечественными разра­ботками подтвердили перспективность таких ИНП.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Широков B.JI.* Электромагнитная совместимость ключевых вторичных источников электропитания с радиоэлектронной аппаратурой // Техн. электро­динамика. 1982. №2. С. 27 — 34.
2. *Мотовилов Н. И.* Бестрансформаторные источники питания // Зарубеж. радиотехника. 1983. №1. С. 61 - 79.
3. *Бассет Д.* Импульсные источники питания: Тенденция развития // Элек­троника. 1988. №1. С. 72 - 77.
4. *Векслер Г.С., Недочетов B.C., Пилинский В.В., Родионова М.В., Тем­ников В.А.* Подавление электромагнитных помех в цепях электропитания. Под редакцией к.т.н. Г.С. Векслера. / Киев: Техника, 1990. 168 с.
5. *Гудинав Ф.* Интегральные схемы управления импульсными источниками питания // Электроника. 1989. № 23. С. 62 - 74.
6. *Гудинав Ф.* Уменьшение потерь в мощных импульсных источниках пи­тания с помощью фазовой модуляции// Электроника. 1991. № 8. С. 17-21.
7. *Лукин А.В., Макаров В.В., Герасимов А.А.* Основы проектирования вы­сокочастотных резонансных преобразователей // Отраслевой семинар «Им­пульсные ИВЭ. Состояние и перспективы развития»: Тез. докл. - М.: ЦОНТИ «Экое», 1989. С. 1 —25.
8. *Лукин А.В., Макаров В.В., Ненахов С.М.* Резонансные преобразователи напряжения // Подсекция «Научные проблемы источников вторичного элек­тропитания» Научного Совета АН СССР: Тез. докл. — М., 1986.
9. *Мелешин В.И., Новинский В.Н.* Транзисторные преобразователи на­пряжения с последовательным резонансным контуром // Электротехника. 1990. №8. С. 47-53.
10. ***Venkataramanan G., Divan D.*** Pulse Width Modulation with Resonant DC Link Converters // Conf. Rec. IEEE IAS. 1990. P. 984 - 990.
11. ***Jonson S.D., Erikson R.W.*** Steady-State Analysis and Design of the Parallel Resonant Converter // IEEE Transactions on Power Electronics. January 1988. Vol. 3, № l.P. 93-104.