

На правах рукописи



СМИРНОВ
Василий Сергеевич

**ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ТРАНЗИСТОРНЫХ КЛЮЧЕВЫХ УСТРОЙСТВ
С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ**

**(МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ,
МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ)**

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2007

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном университете телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича.

Научный руководитель	доктор технических наук, профессор В.А. Филин
Официальные оппоненты	доктор технических наук, профессор А.И. Коршунов кандидат технических наук, доцент А.Г. Алексеев
Ведущее предприятие	ФГУП НПО «Аврора» (Санкт-Петербург)

Защита диссертации состоится « 05 » 04 2007 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 219.004.01 при Санкт-Петербургском государственном университете телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича по адресу: 191186 Санкт-Петербург, наб. р. Мойки, 61.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан « 01 » 03 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 219.004.01
доктор технических наук, профессор



В.Ю. Волков

2007А
5477

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

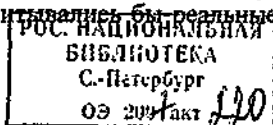
Актуальность темы. Ключевые режимы усиления и преобразования мощности электрических колебаний находят широкое применение в устройствах звуковоспроизведения, в радиовещательных и гидроакустических передатчиках (усилители и модуляторы класса D), в устройствах и системах вторичного электропитания (преобразователи напряжения различных типов). Перевод транзисторов в ключевой режим обеспечивает предельно высокий КПД, существенно улучшает массогабаритные и экономические показатели мощных устройств. Вместе с тем, ключевые усилители и преобразователи, являясь составной частью высококачественной радиоаппаратуры, должны удовлетворять жестким требованиям к стабильности своих выходных характеристик, обеспечивать высокую степень подавления собственных искажений и помех, обладать хорошими динамическими свойствами.

Наиболее эффективным и универсальным средством решения этой задачи является осуществление глубокой отрицательной обратной связи (ООС) в заданной рабочей полосе частот ключевых устройств. Максимизация глубины ООС в этих устройствах основывается на достоверном анализе их устойчивости и синтезе оптимальных цепей коррекции. Математической основой рационального выполнения этих этапов является аппарат частотных характеристик. Для обеспечения надежной устойчивой обратной связи требуется контролировать амплитудно-частотную (АЧХ) и фазочастотную (ФЧХ) характеристики функции петлевого усиления проектируемых ключевых устройств далеко за пределами рабочего диапазона, т.е. до частот, соизмеримых с тактовой частотой блока импульсного управления транзисторными ключами. На этих частотах нелинейные свойства ключевых устройств с ООС проявляются особенно резко и искажают частотные характеристики, формируемые их линейными цепями, т.е. существенно влияют на условия устойчивости и режимы генерации. При этом влияние специфики нелинейного импульсного преобразования, в частности широтно-импульсной модуляции (ШИМ), на частотные характеристики ключевых устройств с ООС изучено недостаточно.

Разработанные в математике и теории автоматического регулирования «достаточные» критерии устойчивости систем с ШИМ сложны и не приспособлены к задаче синтеза корректирующих цепей. Их применение для целей проектирования ООС оказывается нецелесообразным, поскольку требует введения неоправданно больших запасов устойчивости, резко снижающих эффективность применения обратной связи в ключевых устройствах.

Известные инженерные методы усреднения и линеаризации дифференциальных уравнений состояния, описывающих процессы в замкнутой системе с ШИМ, позволяют находить передаточные функции и, соответственно, частотные характеристики линейных моделей таких систем, т.е. имеют прямое отношение к частотным методам анализа устойчивости и синтеза цепей коррекции. Однако погрешность таких моделей, возникающая из-за пренебрежения пульсациями тактовой частоты в замкнутом контуре обратной связи, в общем случае не определена. Эта погрешность зависит от разновидностей ШИМ, видов ООС и резко возрастает с ростом частоты, что в некоторых практических случаях делает невозможным даже качественный анализ устойчивости и режимов генерации, например, на субгармониках тактовой частоты.

В этой связи исследования, направленные на развитие и уточнение метода гармонической линеаризации ключевых устройств, в котором учитывались бы реальные



импульсные процессы в замкнутых структурах этих устройств, становятся актуальными. На основе такой линеаризации могут быть получены эквивалентные частотные характеристики (ЭЧХ), адекватные динамике устойчивых ключевых устройств и позволяющие достоверно оценивать запасы устойчивости, предсказывать режимы генерации, а также решать задачу проектирования глубокой ООС, включая синтез цепей коррекции.

Цель и задачи работы. Целью данной диссертации является разработка новых методик расчета и средств измерения ЭЧХ широких классов ключевых устройств с ООС, их применение к задачам анализа устойчивости и проектирования оптимальных корректирующих цепей устройств с ШИМ. Для достижения этой цели в диссертации решаются следующие задачи:

1. Теоретическое обоснование, разработка алгоритмов и программная реализация численного метода гармонической линеаризации замкнутых динамических систем с ШИМ с учетом высших гармоник спектров модулированных процессов.

2. Совершенствование методов численного анализа процессов в ключевых устройствах с целью радикального повышения скорости расчета по сравнению с известными зарубежными программами схемотехнического моделирования общего назначения.

3. Развитие и применение метода "замкнутого контура" для расчета эквивалентных АЧХ и ФЧХ функции петлевого усиления, частотных зависимостей модуля и фазы комплексных сопротивлений (импедансов) ключевых устройств с различными видами ООС в режиме их нормального функционирования.

4. Распространение принципов гармонической линеаризации и расчета ЭЧХ замкнутых импульсных систем на решение задачи создания нового отечественного технического средства измерения частотных характеристик физических макетов и промышленных образцов ключевых устройств различных целевых назначений.

5. Разработка компьютерной методики синтеза корректирующих цепей, реализующих оптимальные по Боде частотные характеристики петлевого усиления, применительно к системам с ШИМ-управлением в контуре ООС.

6. Экспериментальная проверка эффективности разработанных методик и измерительного комплекса в задачах расчета, измерения и оптимизации частотных характеристик проектируемых ключевых устройств с ООС.

Методы исследования базируются на фундаментальных принципах теории обратной связи и частотных методах анализа устойчивости электрических цепей, методах математического моделирования и алгоритмах спектрального анализа процессов в нелинейных дискретных системах, методах оптимизации, методах цифровой обработки сигналов и экспериментальных измерениях частотных характеристик физических макетов и промышленных образцов ключевых устройств.

Научная новизна основных результатов работы состоит:

- в разработке и применении новых, эффективных в вычислительном отношении алгоритмов расчета и спектрального анализа сложных модулированных процессов в замкнутых нелинейных дискретных системах с ШИМ;

- в усовершенствовании и программной реализации метода "замкнутого контура" применительно к задаче расчета частотных характеристик ключевых преобразователей и усилителей с различными видами ООС в режиме их нормального функционирования на произвольную комплексную нагрузку;

- в распространении принципов моделирования и спектрального анализа процессов в замкнутых импульсных системах на решение задачи создания автоматизированного компьютерного прибора для измерения реальных частотных характеристик физических макетов и готовых образцов ключевых устройств с ООС;

- в получении на основе предложенной компьютерной методики и разработанного прибора ряда новых результатов расчета и измерений частотных характеристик, имеющих определяющее значение для объективной оценки качества проектирования ООС (глубины, запасов устойчивости) в ключевых устройствах и обоснованного выбора оптимальных корректирующих цепей.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Основой численного метода гармонической линеаризации замкнутых ключевых устройств с ШИМ является разработанный в диссертации матричный алгоритм быстрого расчета переходных процессов, представляющий собой комбинацию методов рекуррентных уравнений (А.Д. Артыма) и последовательного удвоения шага (Ю.В. Ракитского).

2. Ввод (инжекция) источника напряжения синусоидальной формы в сечение замкнутой петли ООС, удовлетворяющее условию электрической развязки, и последующая гармоническая линеаризация модулированных сигналов для узловых напряжений данного сечения, позволяют находить эквивалентные АЧХ и ФЧХ функции петлевого усиления ключевых устройств.

3. ЭЧХ петлевого усиления отображают влияние нелинейных свойств блока ШИМ на устойчивость в виде дополнительного фазового сдвига и серии нелинейных резонансов на субгармониках тактовой частоты и предсказывают как периодический, так и хаотический режимы генерации.

4. Использование принципов математического моделирования ЭЧХ и применение методов цифровой обработки реальных электрических сигналов открывает возможность создания нового технического средства – универсального автоматизированного измерителя различных видов АЧХ и ФЧХ физических макетов и готовых образцов широких классов радиотехнических усилителей и преобразователей напряжения, в частности ключевого типа с ШИМ-управлением в контуре ООС.

5. Рассчитанные на моделях или измеренные в реальных устройствах эквивалентные АЧХ и ФЧХ функции петлевого усиления дают достоверную оценку достигнутой глубины ООС и запасов устойчивости, т.е. являются объективным показателем качества готовых устройств. Они также являются исходными характеристиками для оценки неминимально-фазовых свойств системы и применения теорем о вещественной и мнимой составляющих функции цепи, т.е. открывают возможность синтеза оптимальных корректирующих цепей для абсолютно устойчивых ключевых устройств с предельно возможной глубиной ООС в заданной полосе частот.

Практическая ценность работы состоит

- в разработке новой инженерной методики и универсальной компьютерной программы FASTMEAN, превосходящей известные зарубежные аналоги по важнейшим показателям (точность и скорость) и позволяющей на качественно новом уровне выполнять трудоемкий расчет частотных характеристик, учитывающих нелинейный характер процессов в замкнутых ключевых устройствах;

- в создании и внедрении автоматизированного компьютерного прибора для измерения частотных характеристик разрабатываемых и выпускаемых промышленно-

стью ключевых устройств в режиме их нормального функционирования на реальную нагрузку;

- в разработке методики проектирования оптимальных по Бюде частотных характеристик петлевого усиления систем с ШИМ и реализации ее в виде программ для системы MATLAB.

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты диссертационной работы реализованы в универсальной программе моделирования электрических цепей FASTMEAN, автоматизированном приборе для измерения частотных характеристик электронных устройств и наборе программ оптимизации и синтеза цепей коррекции для системы MATLAB. Программа FASTMEAN используется на кафедрах "Теория электрических цепей" и "Схемотехника электронных устройств" СПбГУТ при выполнении научно-исследовательских работ и в учебном процессе. Разработка универсального компьютерного измерителя частотных характеристик ключевых устройств была поддержана грантом СПбГУТ 2005 года. По заказу ряда научно-исследовательских организаций и производственных фирм Москвы и Санкт-Петербурга (ММП-Ирбис, НИИ Вычислительных комплексов, НПО "Аврора", ООО ЭЛИМ) с помощью разработанного прибора были проведены измерения частотных характеристик готовых модулей преобразователей напряжения. Положительные результаты использования разработанного программного обеспечения, методики и измерителя частотных характеристик подтверждены соответствующими актами о внедрении, приведенными в приложении диссертации.

Апробация работы. Основные теоретические положения и практические результаты работы докладывались и обсуждались на юбилейной научно-технической конференции «Связисты СПбГУТ и телекоммуникации XXI века» (Санкт-Петербург, 2000), 3-й МНТК «Техника и технология связи» (Одесса, 2001), 5-й и 6-й ВК «Состояние и перспективы развития энергетики связи» (Санкт-Петербург, 2004, 2005), и НТК СПбГУТ (2003–2006).

Публикации. Основные результаты исследований по теме диссертации представлены в 12 печатных работах, из них 2 статьи в журнале «Практическая силовая электроника» и 4 статьи в сборнике «Труды учебных заведений связи».

Личный вклад автора в работы (в соавторстве), где изложены положения, выносимые на защиту. Работы [5, 8–12] опубликованы совместно с научным руководителем д.т.н., проф. В.А. Филиным и к.т.н. И.Н.Самылиным. Результаты, изложенные в этих работах и выносимые на защиту, получены лично автором диссертации.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения и списка литературы, включающего 81 наименование. Текстовая часть изложена на 117 страницах (иллюстраций 146, таблиц 9). В приложениях на 34 страницах размещены примеры рассчитанных ЭЧХ ключевых устройств, текст программ для системы MATLAB и документы, подтверждающие внедрение результатов работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика диссертационной работы.

Раздел 1 «Сравнительный анализ методов исследования устойчивости процессов в ключевых устройствах с ООС» посвящен классификации и критической оценке общих и специализированных методов, разработанных в математике, теории управления и радиотехнике. Рассмотрены особенности динамики ключевых устройств в устойчивом и автоколебательном режимах. Исследованы условия и эффективность применения существующих методов к задачам анализа устойчивости и последующего синтеза корректирующих цепей.

Из общей структурной схемы ключевых устройств с ООС на рис. 1 (усилители звуковых частот класса D, преобразователи напряжения) следует, что эти устройства относятся к особому классу цепей, основным отличительный признак которых – наличие нелинейной импульсной части (ШИМ и ключевой усилитель мощности – КУМ). Свойства этой части в значительной степени зависят от формы колебания, поступающего на вход блока ШИМ, и определяют динамику всей системы, в частности, устойчивость процессов. В диссертации показано, что реальные автоколебательные процессы в неустойчивой системе с ШИМ могут существенно отличаться от идеализированных гармонических процессов в ее линейной модели. Это обусловлено ограниченным подавлением (как правило, менее чем на 50–40 дБ) пульсаций тактовой частоты в контуре обратной связи, содержащем выходной ФНЧ с реальными характеристиками.

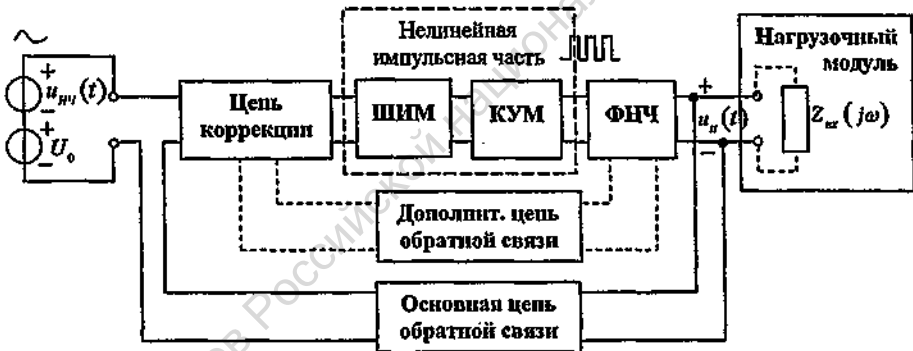


Рис. 1. Структурная схема ключевого устройства с ООС, использующего принцип ШИМ

Ввиду невозможности прямого применения частотных методов анализа устойчивости к системе (рис. 1) рассмотрены известные приближенные методы, позволяющие по нелинейной импульсной части получить эквивалентную систему линейных дифференциальных уравнений или составить линейную схему замещения. Так, метод усреднения предполагает формирование дифференциальных уравнений для каждого из дискретных состояний импульсного устройства и получение усредненной системы уравнений путем взвешенного суммирования, при котором весовые коэффициенты пропорциональны длительности нахождения устройства в каждом из состояний. Метод эквивалентной замены импульсной (ключевой) части схемы основан на ее замещении линейной схемой, включающей идеальный трансформатор и зависимые источники, что позволяет моделировать процессы для средних значений токов и напряжений без учета высокочастотных пульсаций на входе блока ШИМ. Традиционный метод гармониче-

ской линеаризации предполагает замену нелинейной импульсной части комплексной передаточной функцией, зависящей от амплитуды и частоты входного гармонического сигнала, т.е. в этом методе используется гипотеза фильтра и высшие гармоники в спектре выходного сигнала, поступающие по петле обратной связи на вход нелинейной импульсной части, игнорируются. Следовательно, рассмотренные методы не отражают влияние специфики импульсного преобразования сигнала в замкнутой системе (рис. 1) на ее частотные свойства, что в общем случае приводит к существенной погрешности в определении частотных характеристик петлевого усиления.

Показано также, что аналитические методы теории нелинейных импульсных систем на основе *разностных уравнений, уравнений «периодов» и гармонического баланса* в результате громоздких, «ручных» расчетов позволяют получить условия существования режима периодических автоколебаний (генерации) в ключевых устройствах с ШИМ, но только во временной области. Переход в частотную область и использование аппарата частотных характеристик для анализа устойчивости и синтеза оптимальных цепей коррекции в рамках этих методов не представляется возможным. Рассмотрена возможность применения общих методов и критериев, разработанных для непрерывных нелинейных систем. При использовании достаточного *критерия устойчивости Попова* и *второго метода Ляпунова* существует принципиальная возможность сформулировать условия устойчивости ключевых устройств в частотной области. Однако запасы устойчивости при этом оказываются чрезмерно завышенными, что приводит к неоправданно заниженной оценке достижимой глубины ООС и, соответственно, к неоптимальному проектированию.

По результатам аналитического обзора сделан вывод о недостаточном уровне проработки в научной литературе вопросов практического применения частотных методов к анализу устойчивости ключевых устройств и проектированию ООС, учитывающих особенности протекающих в них процессов. Существующие методы получения частотных характеристик нелинейных систем с ШИМ нельзя назвать универсальными и удовлетворительными. Нелинейная динамика ключевых устройств показывает, что в общем случае их точные (эквивалентные) частотные характеристики могут быть получены в результате численного компьютерного расчета и спектрального анализа модулированных процессов в устойчивой замкнутой системе при введении (инъекции) в нее внешнего гармонического возмущения и варьировании его параметров в широких пределах.

Таким образом, для получения ЭЧХ ключевых устройств с ООС в режиме их нормального функционирования на произвольную (пассивную или активную) комплексную нагрузку (рис. 1) необходимо многократно моделировать переходные и установившиеся процессы на длительных временных интервалах, содержащих сотни и тысячи переключений силовых элементов. Отмечается исключительно высокая трудоемкость такой задачи, решение которой может быть получено средствами современной вычислительной техники. Использование алгоритмов известных программ схемотехнического моделирования (MicroCap, P-Cad, MultiSim и др.) для расчета ЭЧХ ключевых устройств является нерациональным. Эти программы требуют выбора весьма малого шага расчета для обеспечения сходимости сложной итерационной процедуры при моделировании процессов переключений силовых элементов, что обуславливает значительные затраты машинного времени и возможность накопления погрешностей. В связи с этим в диссертации ставится задача разработки высокоэффективных в вычисли-

тельном отношении алгоритмов моделирования ключевых устройств во временной области и их реализации в виде компьютерной программы.

В разделе 2 «Развитие численных методов анализа процессов в ключевых устройствах с ООС» проведено обоснование математической модели и разработана методика быстрого и точного расчета процессов в ключевых устройствах с ООС на основе комбинация методов матричного ряда Тейлора и матричных экспонент с последовательным удвоением шага.

Отмечается, что ключевые устройства с ООС относятся к классу нелинейных импульсных систем, в которых структура линейной части цепи изменяется дискретно внутри интервала между коммутациями, причем моменты изменения конфигурации цепи не фиксированы во времени, а являются функциями параметров схемы. С целью распространения эффективных методов расчета линейных электрических цепей на исследуемые системы предложено использовать кусочно-линейную аппроксимацию характеристик нелинейных и ключевых элементов. Процесс в модели ключевого устройства при таком подходе распадается на серию процессов, последовательно протекающих в линейных электрических цепях с постоянными параметрами. Переход от одной линейной цепи к другой происходит при сохранении непрерывности переменных состояния в силу выполнения законов коммутации. Поскольку моменты времени переключений заранее неизвестны, то формулируется задача разработки эффективных процедур их расчета на основе используемых методов.

Таким образом, ставится задача создания методики численного анализа процессов в дискретных системах, обеспечивающей:

- многократное ускорение расчета путем выполнения его шагом от переключения до переключения, избавляя от необходимости подробного расчета переходных процессов малым шагом на длительных временных интервалах;
- быстрое нахождение и уточнение моментов переключений транзисторов, диодов и элементов импульсного управления;
- эффективное численное решение “жестких” уравнений переходных процессов, характерных для ключевых схем.

Для решения этой задачи предложено формировать систему дифференциальных уравнений электрической цепи в нормальной форме (форме Коши) на основе обобщенного матричного метода узловых напряжений:

$$\frac{dv_{LC}}{dt} = D_{LC} v_{LC} + D_0 v_0, \quad (1)$$

где $v_{LC} = [i_L \quad u_C]^T$ - вектор переменных состояния, включающий токи через индуктивности и напряжения на емкостях; $v_0 = [u_0 \quad i_0]^T$ - вектор независимых источников напряжения и тока; D_{LC} и D_0 - матрицы параметров, определяемые на основе цепи, приведенной к резистивной.

Исследовано численное решение системы уравнений (1) на каждом шаге h в виде ряда Тейлора с неограниченным числом членов разложения на основе простого рекуррентного соотношения, предложенного проф. А.Д. Артымом:

$$v_{LC}^{np(k)}(h) = v_{LC}^{np(k-1)}(h) + \frac{h}{k} D_{LC} [v_{LC}^{np(k-1)}(h) - v_{LC}^{np(k-2)}(h)] + \frac{h^k}{k!} D_0 \frac{d^{k-1} v_0(0)}{dt^{k-1}}, \quad (2)$$

позволяющее повысить степень приближения решения системы (1) от нулевого до требуемого значения k ($Пр.k$) путем внесения простых поправок к решениям более низких степеней.

Достоинствами рекуррентного соотношения (2) также являются надежный критерий завершения итераций по достижении требуемой точности

$$\left| v_{LC}^{Пр(k-1)}(h) - v_{LC}^{Пр(k-2)}(h) \right| < \varepsilon$$

и возможность получения аналитического решения для процесса внутри шага h

$$v_{LC}(\tau) = v_{LC}(0) + \sum_{k=1}^q \left[v_{LC}^{Пр(k)}(h) - v_{LC}^{Пр(k-1)}(h) \right] \cdot \left(\frac{\tau}{h} \right)^k. \quad (3)$$

Решение системы (1) также может быть выражено формулой Ньютона-Лейбница

$$v_{LC}(h) = e^{D_{LC} \cdot h} v_{LC}(0) + e^{D_{LC} \cdot h} \int_0^h e^{-D_{LC} \cdot \tau} D_0 v_0(\tau) d\tau, \quad (4)$$

где $e^{D_{LC} \cdot h}$ – матричная экспонента, определяемая по формуле

$$e^{D_{LC} \cdot h} = \sum_{q=0}^{\infty} \frac{1}{q!} (D_{LC} h)^q \approx \sum_{q=0}^k \frac{1}{q!} (D_{LC} h)^q = (e^{D_{LC} \cdot h})^{Пр.k}. \quad (5)$$

Если в схеме отсутствуют независимые источники тока и напряжения, т.е. $v_0(\tau) = 0$, то формула (4) существенно упрощается и принимает вид

$$v_{LC}(h) = (e^{D_{LC} \cdot h})^{Пр.k} \cdot v_{LC}(0).$$

В этом случае для расчета вектора переменных состояния в конце шага h требуется одно умножение матричной экспоненты на вектор переменных состояния в начале шага.

Радикальное увеличение шага расчета в 2^N раз (без потери точности) для метода матричных экспонент возможно с помощью процедуры последовательного удвоения шага, предложенной проф. Ю.В. Ракитским,

$$(e^{D_{LC} \cdot H})^{Пр.k} = \left[\dots \left[\left[(e^{D_{LC} \cdot h})^{Пр.k} \right]^2 \right]^2 \right]^2 \dots \right]. \quad (6)$$

В диссертации показано, что при использовании выражений (5) и (6) возможен оптимальный по критерию минимума вычислительных затрат выбор начального (малого) шага h и числа удвоений шага N , с помощью которых вычисляется основной (большой) шаг расчета процессов $H = h \cdot 2^N$.

Получены формулы для оптимальных параметров, минимизирующих время расчета матричной экспоненты при заданной точности:

$$k \approx \sqrt{\log_2 \left(\frac{D_{\max} \cdot H}{\varepsilon} \sqrt{2\pi} \right)}, \quad N = \frac{1}{k} \log_2 \left(\frac{-(D_{\max} \cdot H)^{k+1}}{\varepsilon \cdot (k+1)!} \right),$$

где D_{\max} – максимальный по модулю элемент матрицы D_{LC} , H – требуемый шаг расчета, ε – требуемая точность расчета на шаге, k – число членов ряда Тейлора (степень приближения решения) при вычислении матричной экспоненты.

Для приведения процессов в цепи к режиму свободных колебаний и реализации высокоэффективного алгоритма (6), предложено имитировать типовые внешние воз-

действия, используемые в ключевых устройствах (постоянное, гармоническое, пилообразное, меандр) дополнительными цепями с зависимыми источниками.

Выполнена сравнительная оценка вычислительных затрат для методов матричного ряда Тейлора, матричных экспонент с последовательным удвоением шага и трапеций в зависимости от порядка цепи n и числа членов ряда Тейлора k . Показано, что при использовании новых методов вычислительные затраты растут пропорционально n^2 , а при использовании стандартного метода трапеций - пропорционально n^3 .

Учитывая, что методы матричного ряда Тейлора и матричных экспонент имеют простые формулы перехода от данной k -й степени приближения к более высокой $(k+1)$ -й (в практических расчетах степень k может достигать величины 60–70), сделан вывод об их существенном превосходстве над методом трапеций и по точности вычислений. Анализ показал, что метод матричных экспонент оказывается наиболее эффективным при расчете «жестких» систем, и его предложено использовать в качестве основного метода расчета процессов в ключевых устройствах. Метод матричного ряда Тейлора в соответствии с формулой (3) позволяет эффективно восстанавливать точки процесса внутри шага и используется в алгоритме для уточнения моментов времени переключений.

Для определения факта переключения предложено использовать простой и эффективный способ – проверку напряжения на нелинейном элементе в конце шага на выход за границы рабочего участка кусочно-линейной характеристики. Дана оценка погрешности расчета в случае пропуска двух переключений на шаге. Для уточнения момента переключения предложено использовать метод секущих совместно с формулой (3).

Таким образом, в этом разделе диссертации разработан полный матричный алгоритм численного анализа процессов в замкнутых ключевых устройствах, основанный на комбинации новых методов. Данный алгоритм реализован автором в универсальной программе ускоренного расчета процессов в электрических цепях с переключениями FASTMEAN.

Раздел 3 «Разработка и применение методики компьютерного расчета эквивалентных частотных характеристик ключевых устройств с ООС» посвящен вопросам автоматизированного расчета различных видов ЭЧХ. Проведен анализ основных факторов, влияющих на точность расчета, и выполнена оценка погрешности.

Разработанная в диссертации компьютерная методика расчета эквивалентных частотных характеристик состоит из четырех основных этапов.

Этап 1. В исследуемой системе отключается источник внешнего гармонического (усиливаемого) сигнала и контролируется устойчивость установившегося процесса. Признаком устойчивости является наличие на выходе КУМ последовательности прямоугольных импульсов с периодом тактовой частоты и заданной скважностью. В определенную точку устойчивой системы вводится пробный сигнал гармонического возмущения $s_B(t) = A_B \sin(2\pi f_B t)$. Система остается замкнутой и продолжает функционировать в рабочем режиме на заданную нагрузку.

Этап 2. Моделируются переходный и установившийся процессы в системе при воздействии на нее сигнала возмущения. В установившемся режиме для заданного шага рассчитываются дискретные значения модулированных сигналов, соответствующих воздействию $x(t)$ и реакции $y(t)$ системы.

Этап 3. По формулам дискретного преобразования Фурье определяются параметры спектральных составляющих сигналов воздействия $\text{Re}\dot{X}_{f_b}$, $\text{Im}\dot{X}_{f_b}$ и реакции $\text{Re}\dot{Y}_{f_b}$, $\text{Im}\dot{Y}_{f_b}$ на частоте возмущения.

Эквивалентный комплексный коэффициент передачи системы на частоте возмущения f_b

$$\dot{H}(j2\pi f_b) = \frac{\text{Re}\dot{Y}_{f_b} + j\text{Im}\dot{Y}_{f_b}}{\text{Re}\dot{X}_{f_b} + j\text{Im}\dot{X}_{f_b}}$$

Эквивалентные АЧХ и ФЧХ ключевого устройства с ООС соответствуют модулю и аргументу данного коэффициента передачи.

Этап 4. Частота f_b и (или) амплитуда A_b сигнала возмущения изменяются и этапы 1–3 повторяются. Таким образом, путем многократного расчета и спектрального анализа модулированных сигналов рассчитываются эквивалентные частотные характеристики (ЭЧХ) исследуемых ключевых устройств в дискретных точках на оси частот.

Данная методика расчета автоматизирована автором в программе FASTMEAN. Благодаря высокой скорости алгоритмов, предложенных во втором разделе диссертации, расчет ЭЧХ типовых ключевых устройств с помощью данной программы выполняется на современном ПК класса Pentium 4 за несколько минут машинного времени.

Для предложенной методики выполнен анализ погрешностей, определяемых особенностями спектрального анализа. Даны рекомендации по выбору длительности анализируемого фрагмента сигнала, формы временного окна и числа точек (шага расчета) на интервале анализа. Показано, что в том случае, если в пределах ширины разрешающей способности по частоте наряду с полезной составляющей сигнала возмущения оказывается побочный продукт дискретизации, точность анализа определяется соотношением сигнал/шум. При соотношениях сигнал/шум, превышающих 30 дБ, относительная погрешность расчета АЧХ не превышает 3.2% (0.3 дБ), а абсолютная погрешность расчета ФЧХ не превышает 1.8 град.

Рассмотрены особенности расчета ЭЧХ петлевого усиления ключевых устройств. Для сохранения характера процессов, протекающих в системе с ООС, предложено использовать метод «замкнутого контура», известный в зарубежной практике измерений как средство поддержания рабочей точки по постоянному току. Приведено обоснование метода «замкнутого контура» и необходимости выполнения условия электрической развязки в сечении ООС, которое выбирается для подачи сигнала возмущения:

модуль входного сопротивления должен существенно (на два порядка) превышать модуль выходного сопротивления.

Методом «замкнутого контура» рассчитаны ЭЧХ петлевого усиления усилителя класса D (рис. 2). Показано, что эквивалентная ФЧХ (рис. 3) значительно отличается в области высоких частот от аналогичной

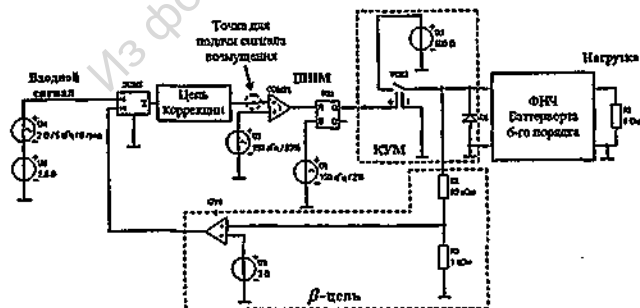


Рис. 2. Структурная схема усилителя класса D с ООС

характеристики, полученной для линеаризованной модели усилителя. ЭЧХ также выявляют серия нелинейных резонансов в окрестностях субгармоник тактовой частоты и наиболее интенсивную серию на второй субгармонике ($f_T/2$), максимальные выбросы которой достигают 6 дБ по амплитуде и 50–60 град. по фазе.

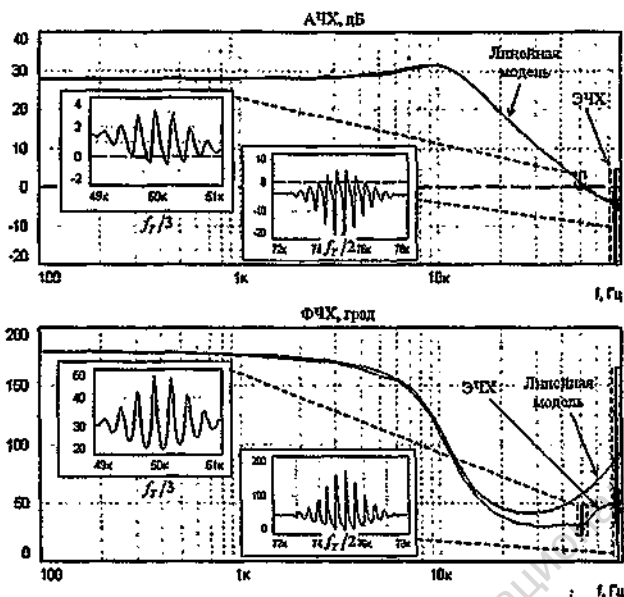


Рис. 3. Эквивалентные частотные характеристики петлевого усиления усилителя класса D и частотные характеристики, полученные с помощью линейной модели

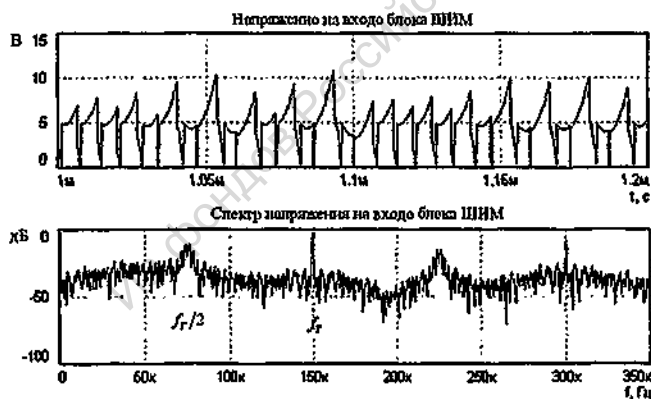


Рис. 4. Режим хаотических автоколебаний в усилителе класса D, предсказанный по виду ЭЧХ, и его спектр

взаимосвязь частотных свойств с динамикой ключевых устройств с ШИМ управлением в контуре ООС. Полученные ЭЧХ позволяют достоверно определять реальные запасы устойчивости, предсказывать режимы генерации и открывают возможность проектирования максимальной ООС в заданной полосе частот ключевых устройств.

Анализ характеристик в данной области частот позволяет сделать вывод о потенциальной возможности выполнения условий генерации при дальнейшем увеличении модуля петлевого усиления не только для частоты $f_T/2$, но и одновременно для группы частот вблизи $f_T/2$. Эта гипотеза объясняет возникновение хаотических колебаний в исследуемом усилителе и подтверждается моделированием процессов в нем (рис. 4) после увеличения коэффициента петлевого усиления на 14–15 дБ.

Выполнен расчет ЭЧХ петлевого усиления и на их основе проведен анализ устойчивости ключевых преобразователей напряжения понижающего и повышающего типов с двухконтурной ООС, работающих на заданную нагрузку. Анализ также подтвердил высокую точность оценки запасов устойчивости данных ключевых устройств по ЭЧХ петлевого усиления и факт возникновения хаотических колебаний при увеличении модуля петлевого усиления.

Констатируется, что именно ЭЧХ петлевого усиления корректно описывают

В разделе также показано применение других видов ЭЧХ для исследования *системной устойчивости*, т.е. устойчивого взаимодействия ключевого устройства как четырехполосника со сложными, в том числе активными, внешними цепями. Приводится методика расчета частотных зависимостей модуля и фазы комплексного входного и выходного сопротивлений преобразователя напряжения с ООС в режиме его нормального функционирования. С помощью полученных зависимостей на основе критерия Миддлбрука проанализирована устойчивость систем преобразователь-комплексная пассивная нагрузка и преобразователь-преобразователь.

В разделе 4 «Разработка и экспериментальная проверка автоматизированного измерителя частотных характеристик ключевых устройств с ООС» принцип расчета ЭЧХ реализован в новом техническом средстве – автоматизированном измерителе частотных характеристик (ИЧХ) физических макетов и готовых образцов ключевых устройств.

Сформулированы принципы реализации аппаратной и программной частей ИЧХ, проанализированы требования к точности аналого-цифрового (АЦП) и цифро-аналогового (ЦАП) преобразования сигналов воздействия и реакции. Для уменьшения случайной погрешности результата предложено усреднять серии измерений и выполнять оценку стандартного отклонения. Измерение частотной точки считается завершенным, если оценка стандартного отклонения не выходит за пределы требуемой точности измерений.

Аппаратная часть ИЧХ реализована на базе устройства АЦП/ЦАП HandyScore3 (Нидерланды) с частотой дискретизации 10 МГц. Программное обеспечение, автоматизирующее процесс измерения частотных характеристик, не входит в комплект HandyScore3, и было разработано автором диссертации. Созданный ИЧХ позволяет измерять частотные характеристики пассивных и активных радиотехнических устройств (аналоговых и ключевых) в диапазоне частот от 50 Гц до 1 МГц при анализе сложных импульсных сигналов и от 10 Гц до 4 МГц при анализе сигналов, близких к гармоническим.

Рассмотрены практические схемы подключения ИЧХ для измерения частотных характеристик петлевого усиления, входного и выходного сопротивлений, коэффициента передачи ключевых устройств. Предложены рациональные способы выбора сечения контура ООС для подачи сигнала возмущения, обеспечивающие условие «развязки» при измерениях петлевого усиления. Показано, что в практических схемах промышленных ШИМ-преобразователей напряжения доступно не менее 3 равноценных точек ввода сигнала возмущения; выбор конкретной точки определяется особенностями монтажа схемы управления и типами используемых микросхем. На рис. 5 представлены две наиболее удобные в практическом отношении схемы измерения частотных характеристик петлевого усиления U_2/U_1 по методу «замкнутого контура». Введение источника гармонического возмущения через инжекционный трансформатор в указанные точки схемы управления действующего устройства обеспечивает корректность измерения ЭЧХ петлевого усиления.

С помощью разработанной методики и ИЧХ проведены измерения различных видов ЭЧХ лабораторного макета преобразователя напряжения и ряда готовых AC-DC и DC-DC модулей отечественных и зарубежных производителей в режиме их нормального функционирования на заданную нагрузку. Для устройств с известной структурой и параметрами (известной математической моделью) отмечается хорошее совпадение расчетных и измеренных ЭЧХ.

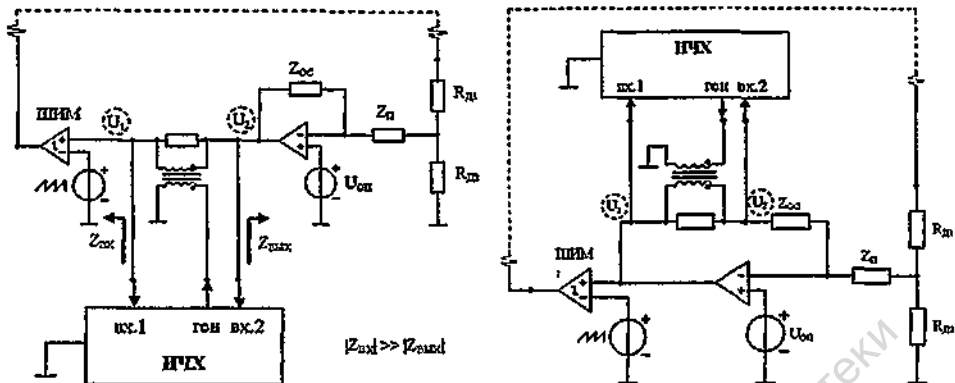


Рис. 5. Практические способы подачи сигнала возмущения в цепь обратной связи ключевых устройств при выполнении измерений петлевого усиления методом «замкнутого контура»

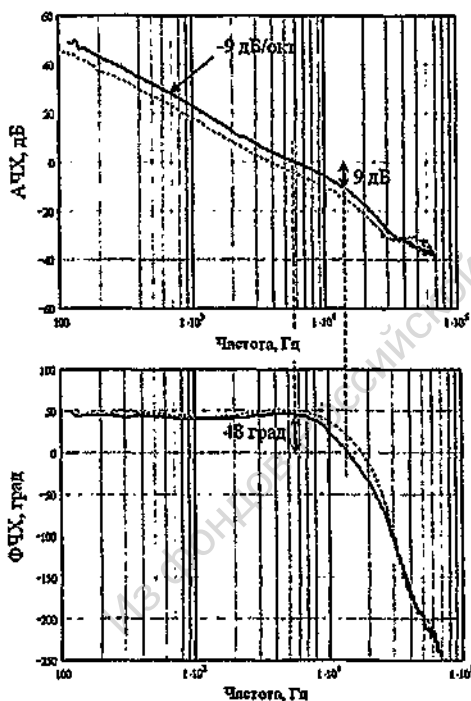


Рис. 6. Измеренные частотные характеристики петлевого усиления DC-DC преобразователя ВПС30В при нагрузке 14 Вт (пунктир - 29 Вт)

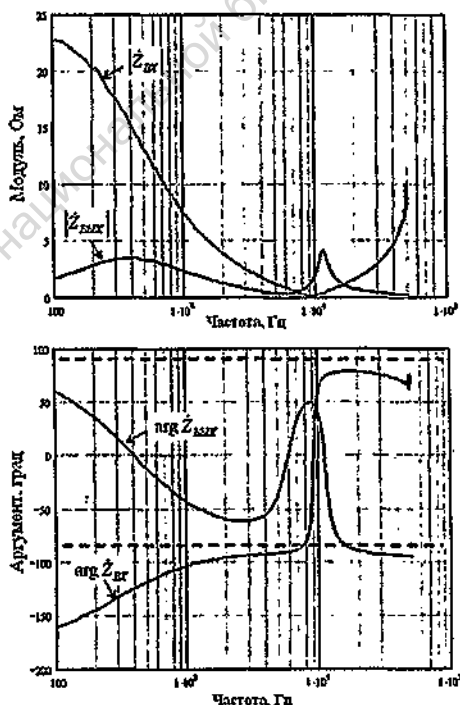


Рис. 7. Измеренные частотные характеристики входного и выходного сопротивлений DC-DC преобразователя МДМ-30

Анализ ЭЧХ петлевого усиления серийно выпускаемых преобразователей показал, что проектирование ООС в большинстве случаев не обеспечивает достаточную глубину обратной связи в относительно широкой полосе частот и оптимальные запасы

устойчивости по амплитуде (8-10 дБ) и фазе (45-60 град.), принятые в международной практике. Отмечается, что из измеренных устройств только АС-DC преобразователь БПС30В отечественного производства имеет характеристики (рис. 6) и, соответственно, запасы устойчивости, близкие к оптимальным.

Также приведена методика и выполнены измерения частотных зависимостей модуля и фазы комплексных входного и выходного сопротивлений преобразователей. В качестве примера на рис. 7 для DC-DC преобразователя МДМ-30 приведены указанные характеристики, которые являются основополагающими для проектирования и построения на базе этих устройств устойчивых распределенных систем питания постоянным током.

Данные, полученные по результатам измерений частотных характеристик по новой методике, в значительной мере дополняют перечень качественных показателей ключевых устройств и дают объективную информацию о реальных запасах устойчивости и, соответственно, надежности при работе на произвольную комплексную нагрузку, а также о возможности совместного использования конкретных типов устройств.

В разделе 5 «Методика проектирования оптимальных частотных характеристик петлевого усиления ключевых устройств с ШИМ-управлением» дано практическое решение задачи максимизации глубины ООС для абсолютно устойчивых систем с ШИМ на основе теорем Боде о связи вещественной и мнимой составляющих функции цепи.

Исходными данными для проектирования являются ЭЧХ петлевого усиления, измеренные в реальных устройствах или рассчитанные на их математических моделях. Формулируются задачи оценки степени близости исходных ЭЧХ к идеализированным оптимальным характеристикам и последующего синтеза цепей коррекции, реализующих эти характеристики с требуемой точностью. Отмечается, что в ключевых устройствах с ШИМ теоретически достижимая по Боде глубина ООС в заданной рабочей полосе частот однозначно определяется следующими параметрами: тактовой частотой, заданным запасом устойчивости по фазе, требуемой степенью подавления пульсаций тактовой частоты, ослаблением сигнала на половине тактовой частоты и дополнительным, т.е. неминимально-фазовым сдвигом ФЧХ.

На первом этапе проектирования по исходным ЭЧХ петлевого усиления выявляются их минимально-фазовые свойства, а также определяются наличие и частотная зависимость дополнительного фазового сдвига в исследуемом устройстве. В системе MATLAB разработана компьютерная процедура такой оценки. Приводится методика, позволяющая выполнить подбор формы оптимальной логарифмической АЧХ (ЛАХ), учитывающей дополнительный фазовый сдвиг и обеспечивающей максимальную глубину ООС в заданной полосе частот при требуемом запасе устойчивости по фазе.

Вторым этапом проектирования ООС в ключевых устройствах является синтез цепи коррекции, ЛАХ которой определяется как разность между исходной ЛАХ петлевого усиления и найденной оптимальной.

Передачная функция синтезируемой линейной цепи коррекции минимально-фазового типа представляется в виде

$$H(p, k, \omega_0, Q_0, \omega_p, Q_p),$$

где k - коэффициент передачи на нулевой частоте, $\omega_0, Q_0, \omega_p, Q_p$ - векторы частот нулей, добротностей нулей, частот полюсов и добротностей полюсов соответственно. За-

дача оптимизации по критерию минимума среднеквадратической ошибки с ограничениями имеет вид

$$\sum_{f_i} \left[20 \lg |H(j2\pi f_i, k, \omega_0, Q_0, \omega_p, Q_p)| - A_i^{корр} \right]^2 \rightarrow \min,$$

$$10^{-6} \leq k \leq 10^6,$$

$$\min\{2\pi f_i\} \leq \omega_0 \leq \max\{2\pi f_i\}, \quad 0.001 \leq Q_0 \leq 100,$$

$$\min\{2\pi f_i\} \leq \omega_p \leq \max\{2\pi f_i\}, \quad 0.001 \leq Q_p \leq 100.$$

где $\{f_i, A_i^{корр}\}$ – значения ЛАХ синтезируемой цепи коррекции в дискретных точках.

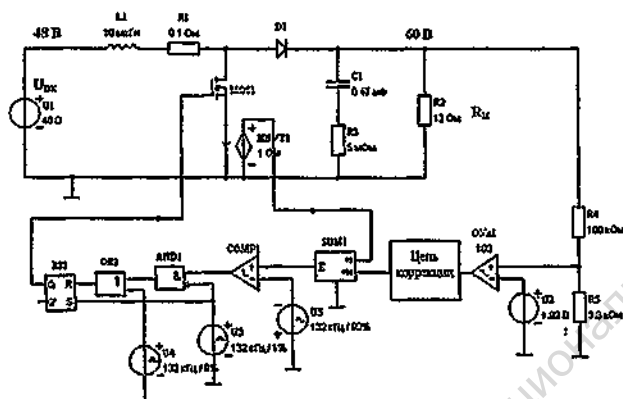


Рис. 8. Модель оптимизируемого DC-DC преобразователя повышающего типа

В результате решения поставленной задачи оптимизации с помощью средств MATLAB определяются нули и полюсы передаточной функции физически реализуемой устойчивой цепи. Для реализации синтезированной передаточной функции в виде каскадного соединения типовых ARC звеньев первого, второго и третьего порядков аналогичным образом решена задача оптимизации отдельных звеньев с ограничениями на параметры резистивных и емкостных элементов. Это решение обеспечивает наилучшее приближение к требуемым характеристикам по критерию минимума среднеквадратической ошибки. Предложенная методика реализована автором в виде набора программ для системы MATLAB.

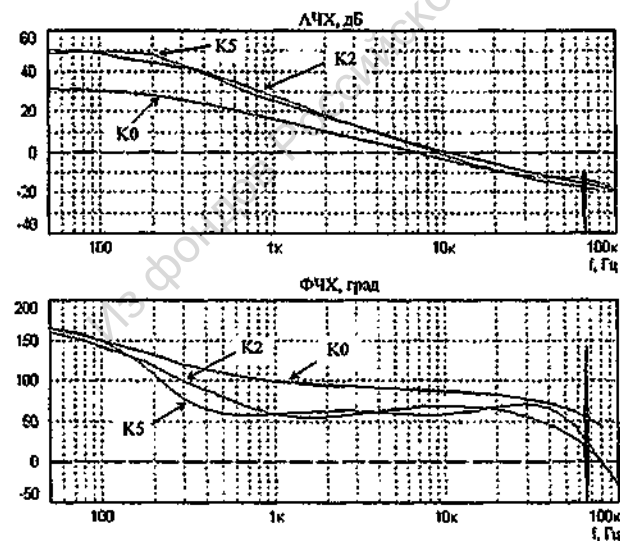


Рис. 9. Частотные характеристики петлевого усиления: K0 – без цепи коррекции (до оптимизации), K2 – с цепью коррекции второго порядка, K5 – с цепью коррекции 5-го порядка

На примере импульсного преобразователя напряжения повышающего типа с двухконтурной ООС (рис. 8) выполнена процедура оптимизации частотных характеристик петлевого усиления. Исходные и

оптимизированные характеристики при использовании синтезированных корректирующих ARC цепей 2-го и 5-го порядков приведены на рис. 9.

В данном разделе также показано, что оптимально спроектированные частотные характеристики петлевого усиления значительно увеличивают стабильность выходного напряжения преобразователя, его способность работать на произвольную комплексную нагрузку, приводят к уменьшению величины выброса при переходных процессах.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предложен эффективный по скорости и точности алгоритм расчета процессов в ключевых устройствах с ООС на основе комбинации методов матричного ряда Тейлора (рекуррентное соотношение) и матричных экспонент с последовательным удвоением шага. Алгоритм реализован автором в программе FASTMEAN и позволяет по сравнению с известными программами схемотехнического моделирования на порядок сократить вычислительные затраты при моделировании процессов в ключевых устройствах и расчете соответствующих эквивалентных частотных характеристик (ЭЧХ).

2. Разработана методика расчета ЭЧХ, основанная на введении в модель ключевого устройства пробного сигнала гармонического возмущения и спектральном анализе модулированных процессов при сохранении нормальной, т.е. замкнутой конфигурации системы. Расчет ЭЧХ автоматизирован автором в программе FASTMEAN.

3. Найденные ЭЧХ петлевого усиления ключевых устройств позволяют с высокой точностью определить реальные запасы устойчивости по амплитуде и фазе и возможные режимы генерации в широком диапазоне частот. Влияние нелинейных свойств ШИМ на устойчивость проявляется в этих характеристиках в виде дополнительного фазового сдвига и серий резонансных всплесков в окрестности субгармоник тактовой частоты. Выявленные с помощью ЭЧХ нелинейные резонансы предсказывают периодические режимы генерации (например, на второй субгармонике $f_T/2$) и хаотические колебания, полностью подтверждающиеся последующим моделированием систем с ШИМ во временной области.

4. Разработан и испытан автоматизированный компьютерный прибор для измерения различных видов эквивалентных частотных характеристик ключевых устройств с ООС в режиме их нормального функционирования на заданную нагрузку.

5. Опыт и результаты применения новой методики измерений ЭЧХ показали необходимость ее широкого внедрения в практику отечественных разработок импульсных источников и систем электропитания, усилителей низкой частоты класса D и других ключевых устройств, использующих принцип ООС.

6. Предложена и реализована в виде программ для системы МАТЛАВ методика оптимизации частотных характеристик петлевого усиления ключевых устройств, позволяющая автоматизировать процесс синтеза цепи коррекции, обеспечивающей максимальную глубину ООС и требуемые запасы по амплитуде и фазе в абсолютно устойчивых ключевых устройствах.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Смирнов В.С., Филин В.А. Отечественная разработка универсальной программы ускоренного компьютерного анализа процессов в радиотехнических целях // НТК «Связисты СПбГУТ и телекоммуникации XXI века»: тез. докл. / СПбГУТ. – СПб, 2000. С. 126-127.
2. Смирнов В.С. Матричный алгоритм быстрого расчета процессов в ключевых устройствах // 3-я МНТК «Техника и технология связи»: доклады / УГАС. – Одесса, 2001. С. 268 - 271.
3. Смирнов В.С., Артым А.Д., Филин В.А. Метод свободных колебаний //54-я НТК: мат-лы / СПбГУТ. – СПб, 2002. С.107.
4. Смирнов В.С. Матричный алгоритм составления уравнений состояния электрических цепей, содержащих емкостные контуры // Труды учебных заведений связи / СПбГУТ. – СПб, 2002 - №168. С. 48 - 55.
5. Смирнов В.С. и др. Оценка влияния внутреннего сопротивления возмущающего генератора на входное и выходное сопротивление ШИМ-преобразователя // Труды учебных заведений связи / СПбГУТ. СПб, 2003. № 169. С. 243 - 250.
6. Смирнов В.С. Задачи анализа устойчивости импульсных распределенных систем электропитания // Труды учебных заведений связи / СПбГУТ. СПб, 2004. №170. С. 102 - 112.
7. Смирнов В.С., Филин В.А. Численный метод гармонической линеаризации замкнутых нелинейных импульсных систем с учетом высших гармоник // Труды учебных заведений связи / СПбГУТ. СПб, 2004. № 171. С. 183 - 193.
8. Смирнов В.С., Самылин И.Н., Филин В.А. Оценка предельной глубины отрицательной обратной связи в ШИМ-преобразователях понижающего типа // Практическая силовая электроника. 2004. Вып. 14. С. 12 - 18.
9. Смирнов В.С., Самылин И.Н., Филин В.А. Автоматизация измерений частотных характеристик коэффициента передачи по петле ООС импульсных источников электропитания // 5-я ВК «Состояние и перспективы развития энергетики связи»: сб. тр. СПб: ПЕТЕРКОН, 2004. С. 112 - 119.
10. Смирнов В.С. и др. Отечественный компьютерный автоматизированный измеритель частотных характеристик аналоговых и импульсных устройств // 6-я ВК «Состояние и перспективы развития энергетики связи»: сб. тр. СПб: ПЕТЕРКОН, 2005. С. 149 - 160.
11. Смирнов В.С., Самылин И.Н., Филин В.А. Развитие частотных методов анализа нелинейных систем с широко-импульсной модуляцией // 57-я НТК: мат-лы / СПбГУТ. – СПб, 2005.
12. Смирнов В.С., Самылин И.Н., Филин В.А. Сравнительный анализ частотных характеристик передачи по петле ООС для импульсной и линейной моделей преобразователя с ШИМ понижающего типа // Практическая силовая электроника. 2005. Вып. 18. С.19-27.

Подписано к печати 08.02.2007

Объем 1 печ. л. Тираж 80 экз. Зак. 10

Тип. СПбГУТ. 191186 СПб, наб. р. Мойки, 61

2007A
5477

Р-5477

Из фондов Российской национальной библиотеки