

АНИСИМОВА ТАТЬЯНА ВИКТОРОВНА

МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ВХОДЕ
ФИЛЬТРОВ ИНВЕРТОРОВ СИСТЕМ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Специальность 05.09.03 – "Электротехнические комплексы и системы"

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2013 г.

Работа выполнена на кафедре «Микроэлектронные электросистемы» ФГБОУ ВПО «Московский авиационный институт (национального исследовательского университета)» (МАИ).

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент **Крючков Василий Васильевич**

Официальные оппоненты: **Лукин Анатолий Владимирович**, доктор технических наук, профессор, академик АЭН РФ, генеральный директор ЗАО «МПП–Ирбис»;

Клебанов Михаил Борисович, кандидат технических наук, инженер-электроник 1-ой категории ОАО «МПО им. И. Румянцева»

Ведущая организация: **Открытое акционерное общество «Аэроэлектромаш»**
(127015, г. Москва, ул. Б. Новодмитровская, д. 12)

Защита состоится «19» ноября 2013 г. в 13:00 на заседании диссертационного совета Д 212.125.07 в ФГБОУ ВПО «Московский авиационный институт (национальном исследовательском университете)» (МАИ) по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское ш., д.4, зал заседаний Ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МАИ.

Автореферат разослан «18» октября 2013 года.

Отзывы на автореферат в одном экземпляре, заверенный печатью организации, просим направлять по указанному адресу.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.125.07,
кандидат технических наук, доцент

Кондратьев А. Б.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В настоящее время существует постоянно возрастающий спрос на устройства преобразования электрической энергии, используемые на борту летательных аппаратов, промышленных предприятиях и в бытовых приборах.

Транзисторные преобразователи напряжения – инверторы – предназначены для преобразования энергии постоянного напряжения в энергию переменного напряжения заданного уровня и качества. Они необходимы для функционирования электронных систем автоматики и вычислительной техники, телекоммуникационных систем, устройств управления электродвигателями, а также осуществления энергосбережения и повышения качества первичного постоянного и переменного напряжений.

Инверторы широко используются на борту летательных аппаратов для питания синхронно-следящих систем, индукционных датчиков, фазочувствительных и других устройств, а также в качестве аварийных источников питания при наличии первичной сети переменного тока, а также преобразователей частоты.

Существенно расширяется область применения инверторов на различных подвижных объектах, а также в системах электроснабжения альтернативной энергетики. Разнообразие объектов – от летательных аппаратов, подвижного транспорта до технологических процессов приводит к большому разнообразию параметров первичных источников и требований к выходным параметрам инверторов.

В силу специфики принципа действия инверторов их удельные характеристики принципиально хуже, чем характеристики других классов источников вторичного электропитания. Все это вызывает повышенный интерес к исследованию процессов в инверторах, а также их параметров, позволяющих повысить надежность и удельные характеристики инверторов.

При этом качество вырабатываемого инверторами напряжения, особенно если существует потребность в регулировании выходного напряжения, должно изменяться в достаточно небольшом диапазоне.

Во многих устройствах, например ИБП, активных фильтрах или регуляторах напряжения в электроэнергетических сетях главными и наиболее важными показателями являются высокое качество формируемых напряжений и их стабильность, а также КПД устройств. Аналогичные требования необходимо выполнять для преобразователей, предназначенных для энергосистем с возобновляемыми источниками электроэнергии. На ветровых фермах преобразование вырабатываемой электроэнергии необходимо для решения проблем выравнивания

несбалансированных уровней напряжения и синхронизации частоты, вырабатываемых большим числом отдельных источников энергии. Аналогичная проблема возникает в случае использования статических источников постоянного напряжения, например солнечных батарей и топливных элементов, когда выработанная энергия постоянного тока должна быть преобразована в энергию переменного тока.

Разработке инверторов систем электрооборудования летательных аппаратов, посвящено достаточно много известных работ направленных на создание теоретических основ построения систем генерирования, методов анализа и синтеза силовых схем, систем и алгоритмов управления. Различные аспекты теоретического и практического плана построения систем генерирования и отдельных её элементов нашли отражение в трудах В.Г. Андреева, В.Ф. Зиновьева, Ю.И. Конева, Н.Н. Лаптева, А.В. Лукина, Г.М. Малышкова, В.И. Мелешина, В.С. Моина, Г.С. Мыцыка, Э.М. Ромаша, Е.Е. Чаплыгина, П. Чети, Б. Бедфорда и Р. Хофта и многих других.

На первом этапе развития силовых полупроводниковых преобразователей инверторы с двух- и трехуровневыми выходными напряжениями считались наиболее пригодными для преобразования электроэнергии для такого класса устройств. Особенности и характеристики, а также недостатки и ограничения таких преобразователей признаны всеми, что подтверждается практикой их применения. Последние достижения в области технологии силовых полупроводниковых приборов позволяют работать на значительно более высоких частотах переключений. Однако эти высокие скорости переключений при использовании режимов ШИМ вызывают повышенные потери в силовых переключающих компонентах, что приводит к снижению КПД инвертора.

Диапазон выходных мощностей является крайне важным и очевидным ограничением применения инверторов с двух- и трехуровневыми выходными напряжениями. Полная мощность определяется свойствами полупроводниковых ключей. Этот существенный недостаток может быть уменьшен за счет применения инверторов с многоуровневыми (ступенчатыми) выходными напряжениями. В последнее время такие инверторы начинают выделять в новый класс преобразовательных устройств. Благодаря их весьма перспективным характеристикам, инверторы с многоуровневым выходным напряжением все более и более становятся альтернативой традиционным инверторам с двух- и трехуровневым выходным напряжением. Они дают возможность решения проблемы ограничения мощности и формирования выходного напряжения, более близкого по форме к синусоидальному. В результате, инверторы с многоуровневым выходным напряжением начинают находить применение в промышленности.

Разработка преобразователей с многоуровневым выходным напряжением включает в себя такие области, как исследование новых структур, стратегий управления и теоретические

исследования. Формирование требуемых форм напряжения возможно самыми различными способами, например, режим ШИМ по синусоидальному закону (ШИМ-СИН), селективное исключение гармоник (СИГ), пространственно-векторная модуляция (ПВМ), формирование ступенчатых форм напряжения. Разработаны разнообразные способы управления преобразователями, например, вычисление соответствующих углов моментов переключения при формировании ступенчатых напряжений, либо для исключения заданных высших гармоник. При реализации любого способа требуется большое число силовых полупроводниковых ключей. Силовые ключи не всегда имеют одинаковые параметры, а их допустимые параметры не всегда полностью используются. Это приводит к снижению КПД преобразователя, что является серьезным недостатком при использовании их на больших уровнях мощностей.

Упомянутые ранее недостатки можно частично преодолеть за счет использования новых структур и стратегий управления, базирующихся на математическом аппарате. В работе рассмотрены способ формирования ступенчатых выходных напряжений инверторов на основе вейвлетных преобразований. Синтез ступенчатых напряжений проведен с использованием набора ортогональных вейвлетов. Рассмотрено вейвлетное преобразование Хаара. Проведено сравнение способов формирования и их влияния на структуру инвертора. Сравнительный анализ проведен с использованием трех критериев – необходимого числа источников постоянного напряжения, коэффициента гармоник и коэффициента режекции.

Таким образом, разработка методов формирования импульсных напряжений на входе фильтров инверторов систем электрооборудования летательных аппаратов является актуальной задачей.

Цель работы заключается в исследовании новых способов формирования ступенчато-импульсных выходных напряжений инверторов с исключением высших гармоник, позволяющих уменьшить массогабаритные показатели инвертора, а так же повысить его КПД в целом, за счет снижения динамических потерь в силовых каскадах и уменьшения массы и габаритов выходного фильтра.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- Проведен анализ существующих режимов формирования многоимпульсных напряжений на входе силового фильтра;
- Разработан и исследован метод синтеза ступенчато-импульсных напряжений на основе вейвлетов Хаара;
- Разработан метод синтеза ступенчато-импульсных напряжений, в спектре которых отсутствуют высшие гармоники, начиная с третьей;
- Разработана уточненная методика расчета выходного фильтра инвертора с учетом предложенного метода синтеза;

– Разработан алгоритм цифрового управления силовыми ключами мостовых коммутаторов инверторов с многоуровневым выходным напряжением;

– Разработаны и исследованы компьютерные модели инверторов с многоуровневым выходным напряжением на основе вейвлетных преобразований Хаара.

Методы исследования

Научные положения работы получены на основе теории электрических цепей, математического анализа, аналогового и цифрового моделирования, программирования, спектрального анализа (быстрое преобразование Фурье).

Достоверность научных результатов, изложенных в работе, обеспечена применением математических методов, использованием различных способов решения одной и той же задачи, а также экспериментальными исследованиями разработанных инверторов.

Научная новизна работы

1. Исследована возможность использования вейвлет-преобразований для синтеза многоимпульсных выходных напряжений инверторов систем электрооборудования летательных аппаратов;

2. Предложена уточненная методика расчета выходных фильтров для режима формирования выходных напряжений инвертора с учетом предложенного метода синтеза;

3. Предложена уточненная методика расчета выходного фильтра для, разработанного метода синтеза многоимпульсного напряжения;

4. Предложен метод цифрового управления инверторами со ступенчато-импульсным выходным напряжением на основе микроконтроллера.

Практическая полезность

Выполненные исследования позволили:

– Получить новые технические решения, позволяющие повысить КПД и снизить массогабаритные характеристики многоуровневых инверторов.

– Существенно упростить алгоритмы цифрового управления такими инверторами.

На защиту выносятся:

– Синтез ступенчато-импульсных напряжений, позволяющих исключать низшие из высших гармонических составляющих и регулировать выходное напряжение инвертора за счет одинакового изменения длительностей импульсов напряжения на входе силового фильтра.

– Уточненная методика расчета выходного фильтра инвертора.

– Алгоритмы цифрового управления, позволяющие реализовать синтезированные многоуровневые напряжения.

– Компьютерные модели инверторов с многоуровневым выходным напряжением с цифро-аналоговым и цифровым методами управления.

Апробация работ

Основные результаты работ докладывались на:

– 8-й международной конференции «Авиация и космонавтика – 2009», 26-29 октября 2009 г., г. Москва;

– 2-й Всероссийской конференции ученых, молодых специалистов и студентов «Информационные технологии в авиационной и космической технике 2009», 20-23 апреля 2009 г., г. Москва;

– Научно-практической конференции молодых ученых и студентов МАИ «Инновации в авиации и космонавтике-2010», 26-30 апреля 2010 г., г. Москва.

– 9-й международной конференции «Авиация и космонавтика – 2010», 16-18 ноября 2010 г., г. Москва;

– 11-й международной конференции «Авиация и космонавтика – 2012», 13-15 ноября 2012 г., г. Москва.

Публикации

Основные результаты диссертации представлены в 17 научно-технических работах, в том числе 11 статей рекомендованных перечнем ВАК.

Структура и объем работ

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, список сокращений и условных обозначений, списка литературы, а также двух приложений. Общий объем работы 120 машинописных страницы, включая 73 рисунка и 10 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цели и задачи, необходимые для ее решения. Показана научная новизна и практическая ценность диссертационной работы, представлены основные положения выносимые на защиту, а также апробации работы.

В первой главе проведен анализ импульсных напряжений, формируемых на выходе мостового коммутатора инвертора.

Одним из основных вопросов при проектировании инверторов напряжений для бортовой системы электропитания ЛА является выбор режима формирования импульсного напряжения на выходе мостового коммутатора инвертора системы электрооборудования летательных аппаратов (однофазного или трехфазного). При этом предпочтение следует отдавать таким напряжениям, в спектре которых отсутствуют низшие из высших гармонических составляющих, оказывающих наибольшее влияние на массу и габариты выходного фильтра инвертора (в случае, когда он необходим по условиям разработки). Крайне желательно, чтобы спектральный состав многоимпульсного напряжения, по крайней мере, качественно не изменялся при регулировании выходного напряжения инвертора.

В ходе исследования был рассмотрен режим ШИР с разным количеством импульсов на половине периода основной гармоники и получен их спектральных составов. Анализ показал, что простое увеличение числа импульсов за половину периода основной гармоники выходного напряжения инвертора практически не дает никакого выигрыша с точки зрения спектрального состава и способности импульсного напряжения к фильтрации.

Также было выявлено, что напряжение режима кодового широтно-импульсного регулирования (ШИР-КД) наиболее просто реализуются на выходе мостового коммутатора цифро-аналоговыми методами. Синтез напряжений режима ШИР-КД, в спектре которых отсутствует заданное число низших из высших гармонических составляющих, наиболее трудно поддаются фильтрации для формирования на выходе инвертора синусоидального напряжения заданного качества. Проведенный анализ показал, что режим ШИР-КД позволяет существенно улучшить качество импульсного напряжения, однако недостатком режима ШИР-КД является то, что число исключаемых высших гармоник равно числу импульсов за четверть периода основной гармоники, что не позволяет исключать большое число высших гармоник без существенного увеличения потерь на переключение транзисторного коммутатора, а так же несколько улучшить спектр напряжения режима ШИР-КД позволяет использование избыточных режимов, позволяющих существенно ослабить амплитуды первых неисключенных высших гармоник.

В работе показано, что спектральный состав напряжения режима двухуровневой ШИМ-СИН существенно зависит от числа импульсов за период основной гармоники выходного напряжения инвертора. Если число импульсов четное – в спектре напряжения содержатся высшие гармоники только с четными номерами, а если нечетное – только с нечетными номерами, однако в спектре напряжения режима трехуровневой ШИМ содержатся только нечетные гармоники. Таким образом, выявлено, что наибольшее число высших гармоник при заданном числе импульсов за период основной гармоники позволяет исключить режим ШИМ по синусоидальному закону (ШИМ-СИН), а так же при выборе напряжения режима ШИМ-СИН следует отдавать предпочтение напряжению трехуровневого режима ШИМ-СИН, при прочих равных условиях имеющему наилучший спектральный состав.

Во второй главе рассмотрен способ формирования ступенчатых выходных напряжений инверторов на основе вейвлетных преобразований. Синтез ступенчатых напряжений проведен с использованием набора ортогональных вейвлетов. Рассмотрено вейвлетное преобразование Хаара. Проведено сравнение способов формирования и их влияния на структуру инвертора. Сравнительный анализ проведен с использованием трех критериев – необходимого числа источников постоянного напряжения, коэффициента гармоник и коэффициента режекции.

Выявлено, что форма вейвлетов Хаара во многом схожа с формами напряжений, формируемых в однофазных инверторах с помощью мостового коммутатора. Сдвигом и длительностью вейвлетов легко управлять. Благодаря этим свойствам имеется возможность применения вейвлетов для синтеза выходных ступенчатых напряжений для многоуровневых инверторов. Проведен расчет вейвлет коэффициентов и получены аппроксимирующие функции.

На рисунках 1-4 показаны последовательные шаги аппроксимации вейвлетами функции и их спектральные составы.

Проведено сравнение свойств синтезированных напряжений с типовыми формами ступенчатых напряжений, традиционно используемыми при разработке многоуровневых инверторов.

В качестве объекта для сравнения взят каскадный многоуровневый инвертор, в котором напряжения питания всех мостовых каскадов одинаковы. Напряжение источника постоянного напряжения делится на число уровней выходного напряжения, при этом каждая ячейка активна в один и тот же интервал времени.

Сравнение параметров показало, что для одинакового числа независимых источников постоянного напряжения коэффициент гармоник изменяется в зависимости от используемого режима аппроксимации. Вейвлетная аппроксимация имеет преимущества относительно традиционного способа при низких уровнях аппроксимации.

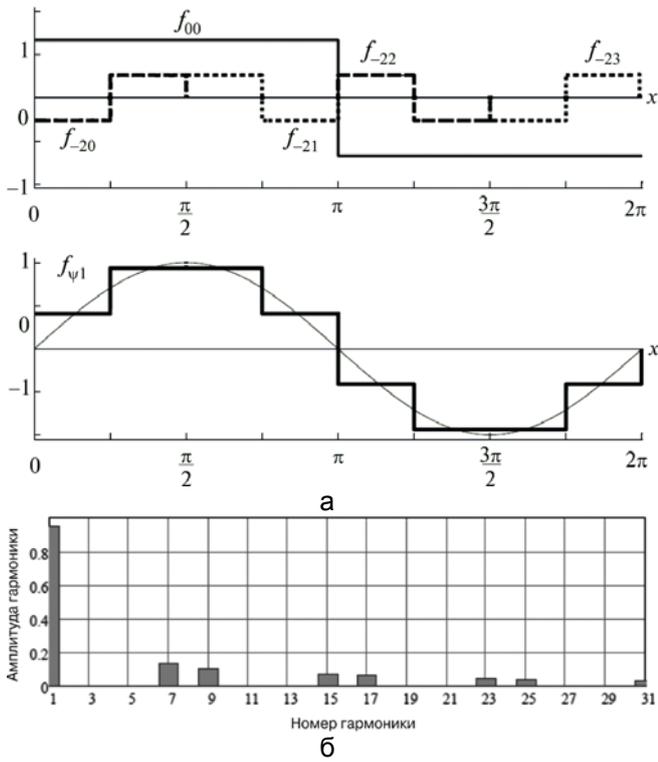


Рис. 1. Первый шаг аппроксимации вейвлетами (а), спектральный состав аппроксимирующей функции (б)

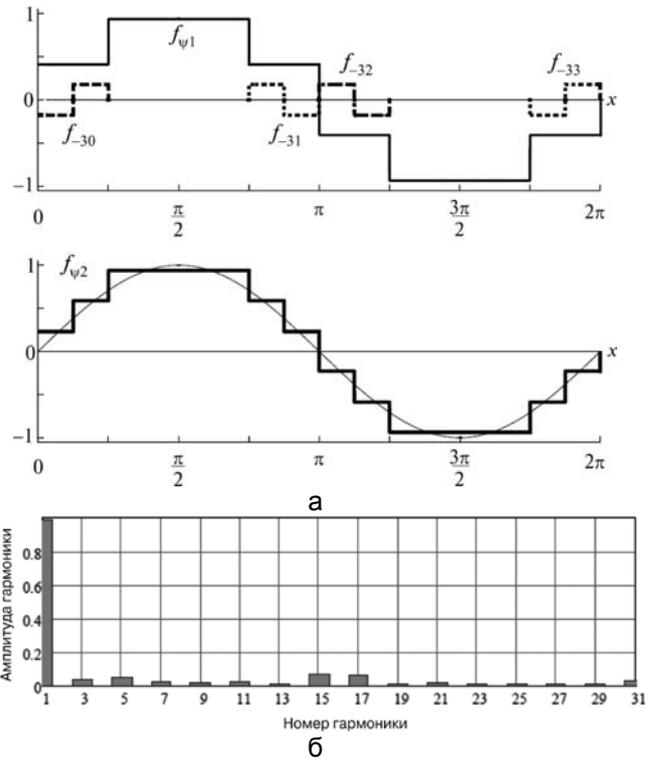


Рис. 2. Второй шаг аппроксимации вейвлетами (а), спектральный состав аппроксимирующей функции (б)

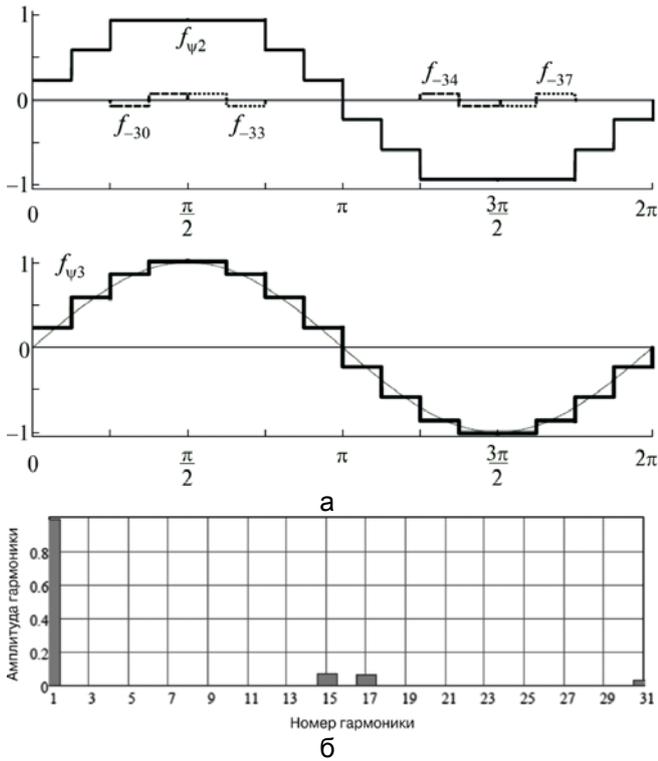


Рис. 3. Третий шаг аппроксимации вейвлетами (а), спектральный состав аппроксимирующей функции (б)

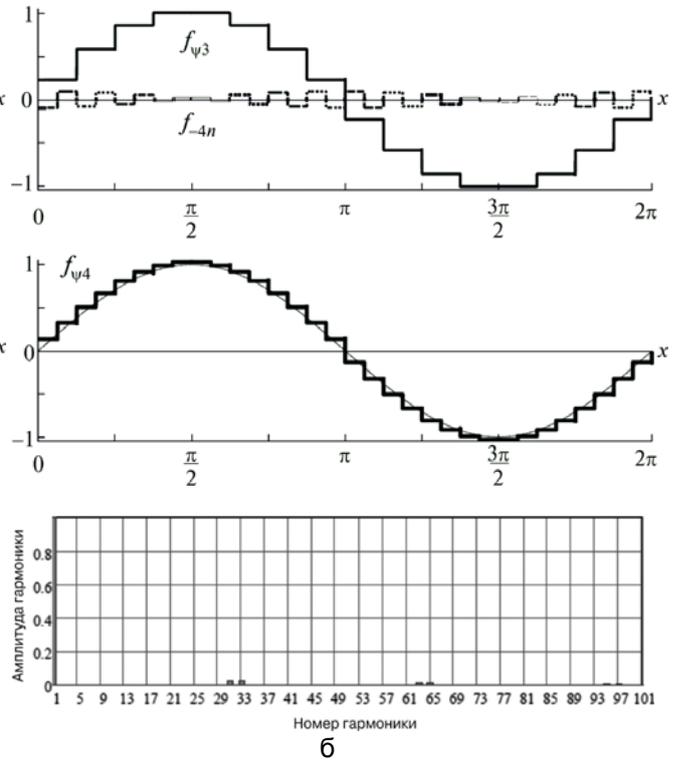


Рис. 4. Четвертый шаг аппроксимации вейвлетами (а), спектральный состав аппроксимирующей функции (б)

Получено, что на четвертом шаге для реализации синтезированных форм с помощью вейвлетных преобразований потребуется большее число источников постоянного напряжения, чем при традиционных способах аппроксимации. Поэтому дальнейшие шаги вейвлетной аппроксимации нецелесообразны.

Показано, что способ формирования ступенчатых напряжений на основе вейвлетных преобразований имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными способами. Инвертор с выходным напряжением, сформированным на основе вейвлетных преобразований позволяет обеспечить лучшую и более быструю адаптацию формы выходного напряжения к синусоидальной. Для аппроксимации низкого уровня, включая трех- и четырехуровневые инверторы, синтез с помощью вейвлетных преобразований имеет лучшие показатели и позволяет обеспечить лучшие формы аппроксимации. Кроме того, формирование выходных напряжений с помощью вейвлетных преобразований обладает следующими свойствами:

- исключение низших из высших гармоник из спектра выходного напряжения при минимальном числе ступенек (уровней);
- относительно небольшая частота переключений всех мостовых коммутаторов инвертора;
- различные уровни мощностей мостовых коммутаторов (ячеек) инвертора;
- достаточно простая схема управления инвертором;
- возможность реализации схемы управления инвертором на основе микроконтроллера.

Инверторы, разработанные на основе предложенного способа, могут быть использованы в мощных источниках бесперебойного питания, распределенных системах генерирования электроэнергии с источниками постоянного напряжения, например, солнечными батареями, ветроэнергетическими установками или топливными источниками с дискретными уровнями напряжения. Наличие таких источников позволяет легко группировать ячейки для обеспечения необходимых уровней ступенек многоуровневых инверторов.

Рассмотренные способы синтеза напряжений на основе вейвлетов Хаара позволяют получить многоуровневые импульсные напряжения, амплитуда основной гармоники которых регулируется за счет одинакового изменения длительностей импульсов (широтно-импульсное регулирование – ШИР), амплитуды которых рассчитываются с помощью коэффициентов вейвлетов. При этом в спектрах таких напряжений будут отсутствовать низшие из высших гармонических составляющих. Такие напряжения будем называть напряжениями режима ШИР-СТ- X/p , где p – число импульсов на четверти периода основной гармоники.

Обобщенная форма напряжения режима ШИР-СТ- X/p показана на рис. 5.

Анализ импульсных напряжений, синтезированных на основе вейвлетов Хаара, показал, что исключение низших из высших гармоник возможно только при числе импульсов за четверть периода основной гармоники $p = 2^n$, где $n = 1, 2, 3, \dots$

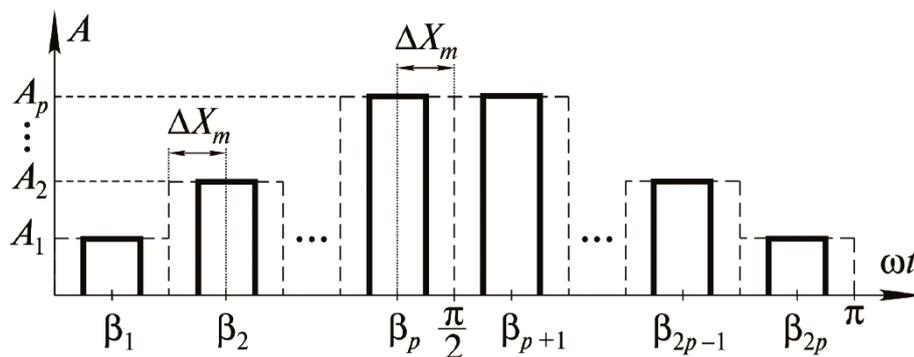


Рис. 5. Обобщенная форма режима ШИР-СТ-Х/р

Амплитуду любой гармоники напряжения ШИР-СТ-Х/р можно рассчитать по формуле

$$B_q = \frac{8}{q} \sin q \delta_M X_m \sum_{i=1}^p A_i \sin q \beta_i,$$

где A_i – амплитуда i -ой ступеньки ($i = 1 \dots p$);

q – номер гармоники;

$\delta_M = 0 \dots 1$ – коэффициент регулирования;

ΔX_m – половина максимальной длительности импульса

$$X_m = \frac{U_M}{4p};$$

β_i – координата центра i -го импульса ($i = 1, 2, \dots, p$)

$$\beta_i = \frac{(2i-1)\Delta X_m}{4p}.$$

Коэффициент регулирования (δ_M) для режимов ШИР при одинаковом изменении длительностей всех импульсов определяется как отношение постоянного напряжения на выходе контура обратной связи инвертора (U_{oc}) к максимальной величине модулирующего напряжения (в данном случае треугольной формы – U_M), а амплитуды ступенек напряжения определяются суммированием соответствующих вейвлет коэффициентов для функций Хаара.

Проведенный анализ ШИР-СТ-Х/р с различным числом импульсов за четверть периода, выявил, что практическая реализация напряжений режима ШИР-СТ-Х/р при $p > 4$ нецелесообразна, поскольку спектральный состав таких существенно ухудшается при коэффициентах регулирования, отличных от 1, что существенно повлияет на параметры выходного фильтра.

Практическая реализация инвертора в режиме ШИР-СТ-Х/8 целесообразна совместно со стабилизированным преобразователем (промежуточным звеном постоянного) тока, поскольку коэффициент гармоник напряжения режима ШИР-СТ-Х/8 составляет $\approx 5,3\%$.

В третьей главе проведен расчет параметров выходного фильтра инвертора.

Выходной фильтр необходим для обеспечения заданного качества выходного (синусоидального) напряжения инвертора. Габариты силового однозвенного LC-фильтра определяются заданным качеством выходного напряжения, т. е. коэффициентом инвертора, выходной мощностью и спектральным составом многоимпульсного напряжения, формируемого на выходе мостового коммутатора. Анализ спектральных составов импульсных напряжений при различных видах модуляции показал, что при регулировании амплитуды основной гармоники в диапазоне изменения входного напряжения или величины нагрузки импульсное напряжение имеет наихудший спектральный состав при минимальном коэффициенте регулирования.

Исходными данными для расчета силового фильтра инвертора режима ШИР-КД являются величина выходного напряжения инвертора и его частота, минимальное и максимальное значения напряжения питания мостового коммутатора $E_{п\ min}$ и $E_{п\ max}$, полная выходная мощность инвертора $S_{вых}$ (В·А), коэффициент мощности ($\cos\varphi$) и коэффициент гармоник выходного напряжения инвертора $k_{г\ вых}$.

При заданной выходной мощности ($P_n = S_{вых} \cos\varphi$), если она постоянная, или ее максимальном значении ($P_{n\ max}$) в случае ее изменения, а также минимальном напряжении питания мостового коммутатора индекс модуляции выбирается близким к единице (0,95...0,99). Далее определяется минимальный индекс модуляции.

Проведен расчет параметров выходного фильтра инвертора для двух условий:

- ✓ обеспечение максимума коэффициента передачи напряжения в нагрузку;
- ✓ обеспечение минимума относительной суммарной мощности элементов фильтра.

Построена зависимость модулей коэффициентов передачи фильтра по основной гармонике от относительной резонансной частоты (m) при обеспечении максимума передачи напряжения в нагрузку ($W_{A1\ max}$) и минимума относительной суммарной мощности элементов фильтра ($W_{P1\ min}$).

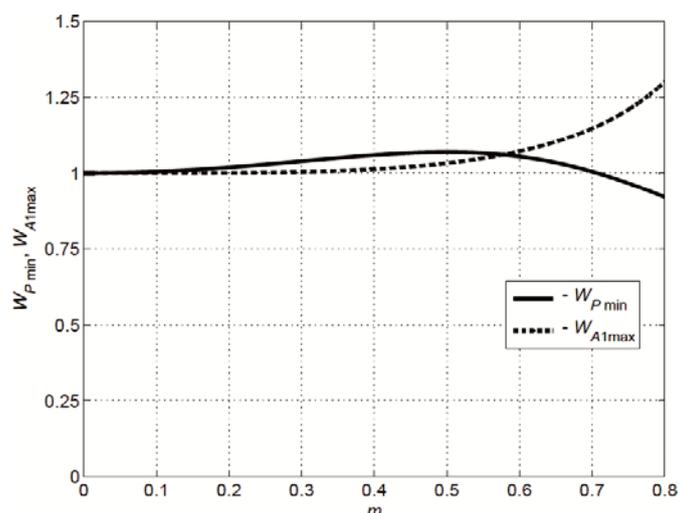


Рис. 6. зависимость модулей коэффициентов передачи фильтра по основной гармонике от относительной резонансной частоты (m) при обеспечении максимума передачи напряжения в нагрузку (W_{A1max}) и минимума относительной суммарной мощности элементов фильтра (W_{P1min})

Из рис. 6 видно, что расчет параметров фильтра на максимум коэффициента передачи напряжения в нагрузку целесообразен только при $m > 0,6$, т. е. импульсных напряжениях с крайне плохим спектральным составом. Во всех остальных случаях предпочтение следует отдавать расчету на минимум относительной мощности компонентов фильтра.

Произведен расчет параметров выходного фильтра для режима ШИР-КД, для двух условий, результаты расчета приведены в таблице 1. Получена форма и начальный участок спектра напряжения режима ШИР-КД 7,11/5 при $\delta_{M \min}$ показаны на рис. 7.

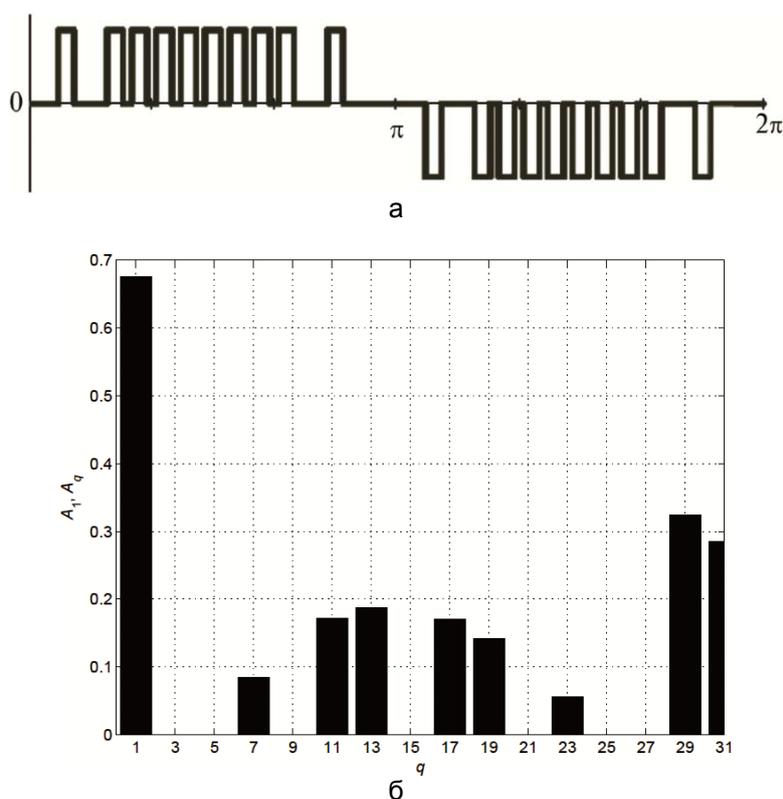
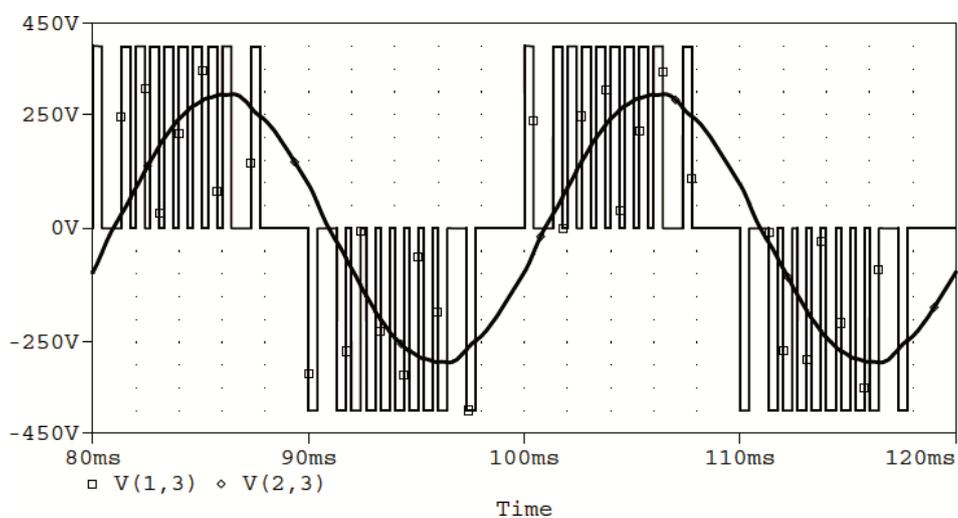


Рис. 7. Форма напряжения (а) и начальный участок спектра напряжения режима ШИР-КД 7,11/5 (б) при $\delta_{M \min}$

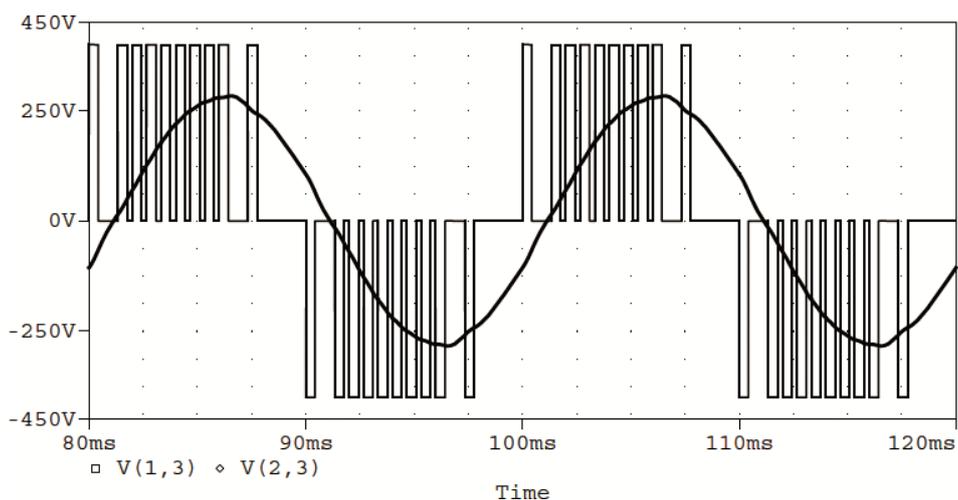
Таблица 1

| Минимум относительной суммарной мощности | | | | | Максимум коэффициента передачи напряжения в нагрузку | | | | |
|------------------------------------------|---------------------------|---------------|-------------------------|-------------------------|------------------------------------------------------|---------------------------|---------------|--------------------------|--------------------------|
| $W_{1P_{\min}}$ | $A_{1\phi_{\min}}$, В | R_H , Ом | $L_{P_{\min}}$, мГн | $C_{P_{\min}}$, мкФ | $W_{1A_{1\max}}$ | $A_{1\phi_{\max}}$, В | R_H , Ом | $L_{A_{1\max}}$, мГн | $C_{A_{1\max}}$, мкФ |
| 1,068 | 288,26 | 103,89 | 198 | 14,3 | 1,042 | 281,15 | 98,81 | 200 | 14,2 |

Результаты моделирования инвертора в режиме ШИР-КД 7, 11/5 при рассчитанных параметрах фильтра показаны на рис. 8. Полученный при моделировании $k_{Г\text{вых}} \approx 2\%$.



а

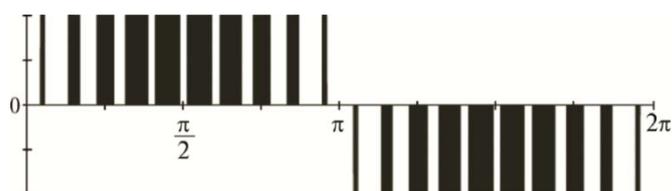


б

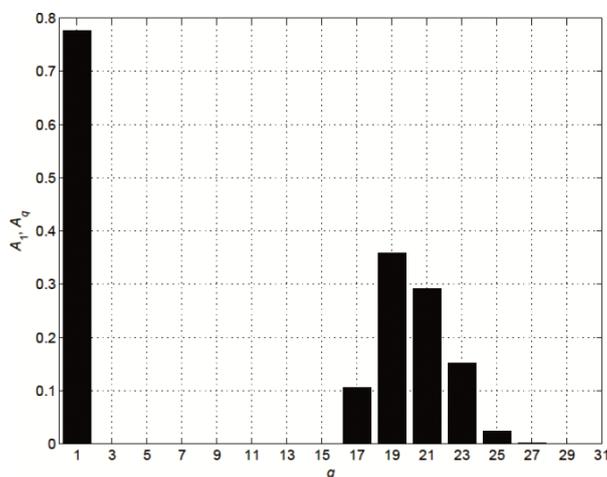
Рис. 8. Результаты моделирования инвертора в режиме ШИР-КД 7, 11/5 при параметрах фильтра, рассчитанных на минимум относительной суммарной мощности (а) и максимум коэффициента передачи напряжения в нагрузку (б)

Из приведенного примера видно, что, поскольку $t < 0,6$, следует использовать методику расчета на минимум относительной суммарной мощности элементов фильтра.

Произведен расчет параметров выходного фильтра для режима ШИМ–СИН, для двух условий, результаты расчета приведены в таблице 2. Получена форма и начальный участок спектра напряжения режима ШИМ–СИН при числе импульсов за половину периода $p = 10$ показаны на рис. 9.



а



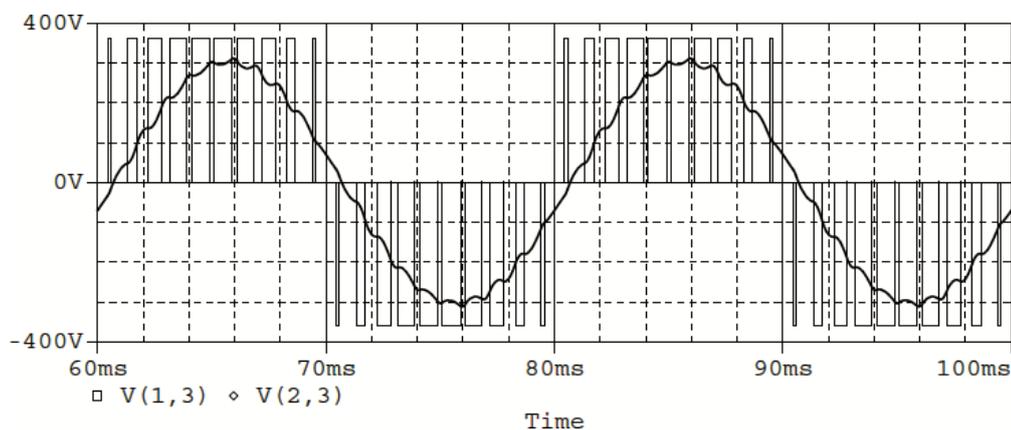
б

Рис. 9. Форма напряжения режима ШИМ-СИН при $p = 10$ (а) и начальный участок спектра при $\delta_{M \min}$

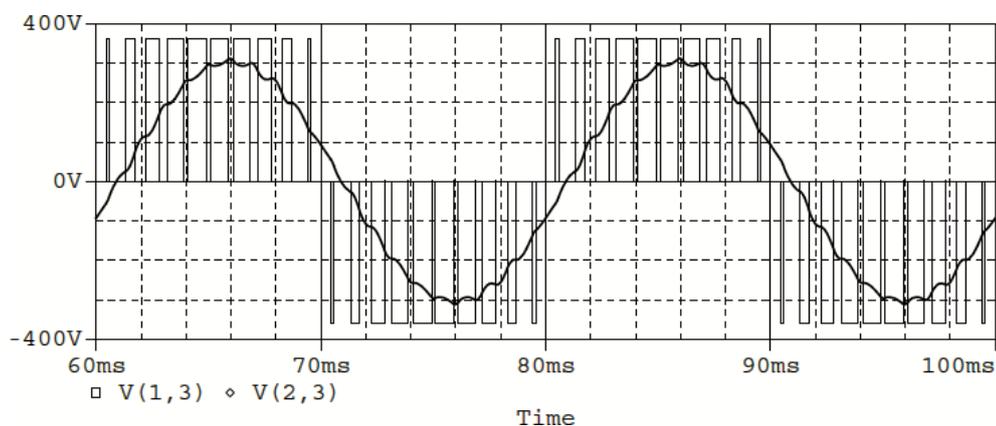
Таблица 2

| Минимум относительной суммарной мощности | | | | | Максимум коэффициента передачи напряжения в нагрузку | | | | |
|------------------------------------------|---------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------------------------------------|---------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|
| $W_{1P_{\min}}$ | $A_{1\Phi_{\min}}$, В | $R_{\text{н}}$, Ом | $L_{P_{\min}}$, мГн | $C_{P_{\min}}$, мкФ | $W_{1A_{1\max}}$ | $A_{1\Phi_{\max}}$, В | $R_{\text{н}}$, Ом | $L_{A_{1\max}}$, мГн | $C_{A_{1\max}}$, мкФ |
| 1,022 | 317,4 | 125,91 | 89 | 5,36 | 1,001 | 310,9 | 120,9 | 115 | 4,139 |

Результаты моделирования инвертора в режиме ШИМ-СИН ($p = 10$) при рассчитанных параметрах фильтра показаны на рис. 10. Полученный при моделировании $k_{\Gamma \text{ вых}} \approx 3\%$.



а



б

Рис. 10. Результаты моделирования инвертора в режиме ШИМ-СИН ($p = 10$) при параметрах фильтра, рассчитанных на минимум относительной суммарной мощности (а) и максимум коэффициента передачи напряжения в нагрузку (б)

Выявлено, что при выборе параметров выходного фильтра инвертора учет только первой неисключенной высшей гармоники при вычислении коэффициента режекции не позволяет обеспечить заданное качество выходного напряжения.

Анализ синтезированных режимов ШИР-СТ- X/p показал, что спектральный состав таких напряжений значительно ухудшается при коэффициентах регулирования, отличных от максимального, особенно для режима ШИР-СТ- $X/8$. Таким образом, при расчете минимального коэффициента регулирования коэффициент k_x необходимо выбирать в диапазоне $0,3 \dots 0,6$.

Таким образом, методика расчета выходного фильтра инвертора в режиме ШИР-СТ- X/p выглядит следующим образом.

Рассчитаем параметры выходного фильтра инверторов в режиме ШИР-СТ- X/p Результаты расчетов выходных фильтров для синтезированных режимов ШИР-СТ- X/p приведены в табл. 3.

Таблица 3

| Режим | L_{ϕ} , мГН | C_{ϕ} , мкФ |
|------------|------------------|------------------|
| ШИР-СТ-Х/2 | 210 | 12 |
| ШИР-СТ-Х/4 | 128 | 8 |
| ШИР-СТ-Х/8 | 55 | 3,7 |

Результаты моделирования инверторов в режиме ШИР-СТ-Х/р с параметрами выходных фильтров, представленными в табл.3, приведены в главе 4.

Получено, что для импульсных напряжений, в которых помимо третьей исключен еще ряд высших гармоник, параметры выходного фильтра следует выбирать из условия минимума относительной установленной мощности элементов фильтра.

В четвертой главе проведено компьютерное моделирование процессов в инверторах в режиме ШИР-СТ-Х/р с аналогово-цифровым управлением.

Разработана блок-схема инвертора в режиме ШИР-СТ-Х/р в случае использования аналого-цифровых методов регулирования показана на рис. 11. Она состоит из силовой части, включающей мостовые коммутаторы (M_1-M_n), число которых зависит от числа уровней импульсного напряжения, формируемого на входе фильтра, и выходной фильтр, а также схемы управления.

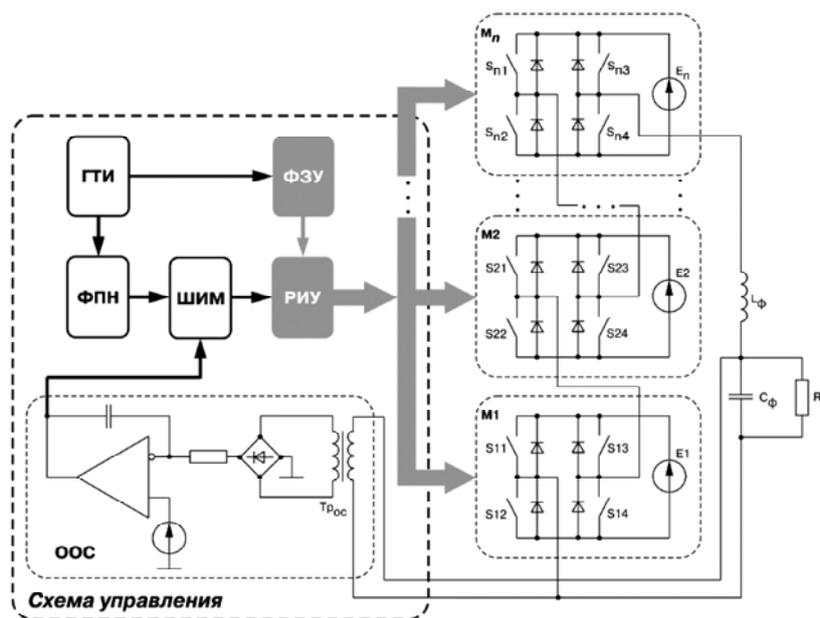


Рис. 11. Блок-схема инвертора в режиме ШИР-СТ-Х/р

В случае аналого-цифрового формирования сигналов управления мостовыми коммутаторами схема управления состоит из:

- генератора тактовых импульсов (ГТИ), задающего частоту работы всего устройства;

- формирователя закона управления (ФЗУ), на выходах которого формируются сигналы управления мостовыми коммутаторами при максимальном коэффициенте регулирования;
- распределителя импульсов управления (РИУ), с выходов которого сигналы управления, регулируемые по длительности, подаются на соответствующие ключи мостовых коммутаторов;
- формирователя пилообразного или треугольного напряжения (ФПН);
- широтно-импульсного модулятора (ШИМ);
- устройства отрицательной обратной связи (О.О.С.);

Разработана схема модели инвертора в режиме ШИР-СТ-Х/2 с аналогово-цифровой схемой управления (рис. 12). Схема создана на основе моделей реальных электронных компонентов, за исключением трансформатора обратной связи и выпрямителя, поскольку известно, наиболее трудно в PSpice моделируются электромагнитные компоненты. Использование двухполупериодного активного выпрямителя в реальной схеме дает совершенно аналогичные результаты.

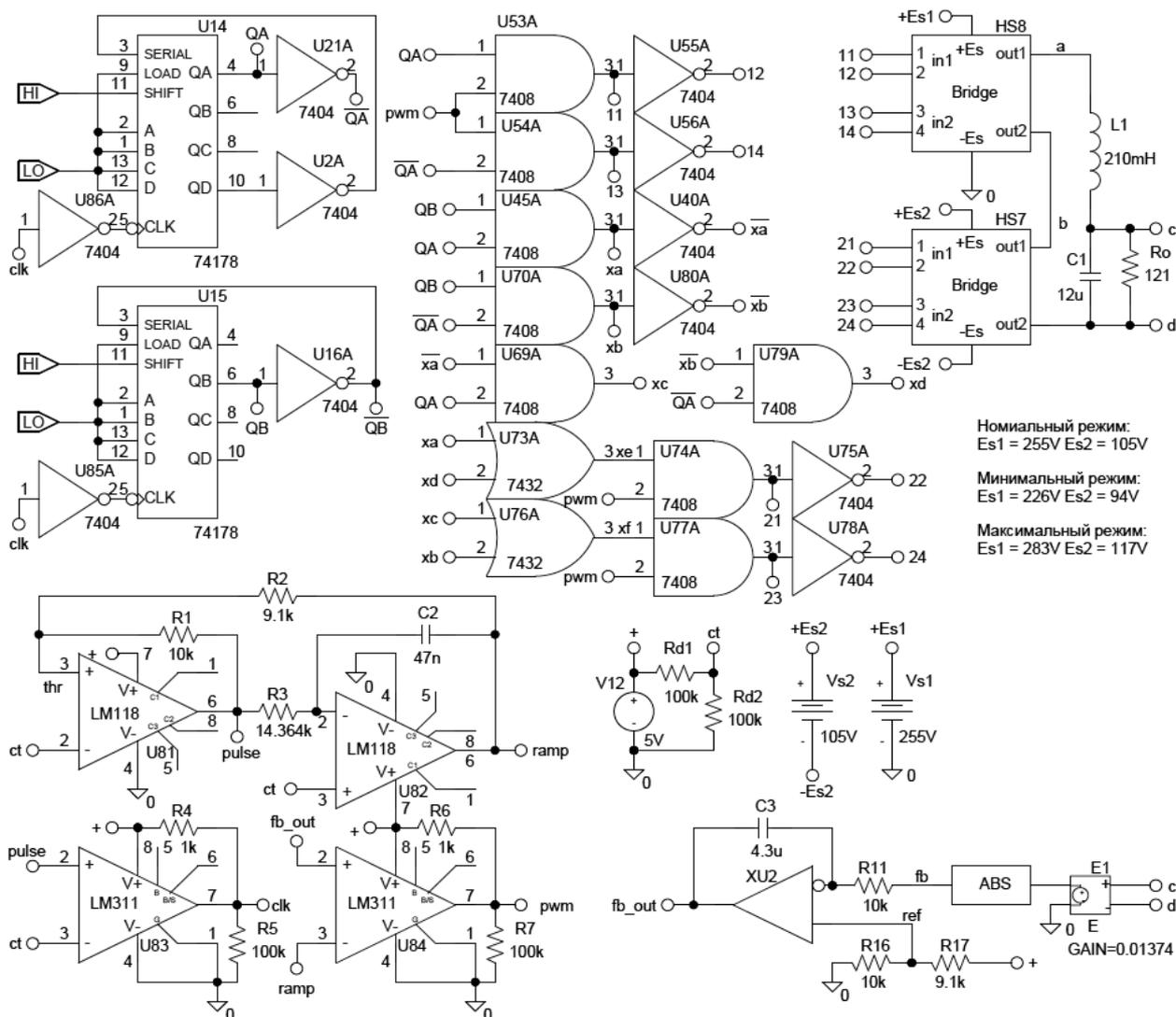


Рис. 12. Схема модели инвертора в режиме ШИР-СТ-Х/2 с аналого-цифровым управлением

Параметры выходного фильтра инвертора рассчитаны по методике, приведенной в главе 3. В результате получены: индуктивность дросселя фильтра $L_1 = 210$ мГн, емкость конденсатора фильтра $C_1 = 12$ мкФ.

Полная мощность инвертора 1 кВА, напряжения источников E_{s1} и E_{s2} питания рассчитаны с помощью коэффициентов вейвлетов Хаара при условии, что номинальное напряжение питания $E_n = 360 \text{ В} \pm 10\%$. При этом выходное напряжение не должно изменяться более, чем на 2%.

В ходе моделирования проверен целый ряд режимов работы инвертора. На рис. 13 показаны результаты моделирования аналоговых сигналов в схеме управления – напряжения на входе операционных усилителей U_{81} , U_{82} и компаратора U_{83} . Этот компаратор необходим для обеспечения напряжения логического нуля для цифровой части схемы управления.

Формирование сигналов управления мостовыми коммутаторами в цифровой части схемы управления показано на рис. 14. Временные диаграммы процессов в силовой части инвертора при номинальном напряжении питания: напряжения, показаны на рис. 15.

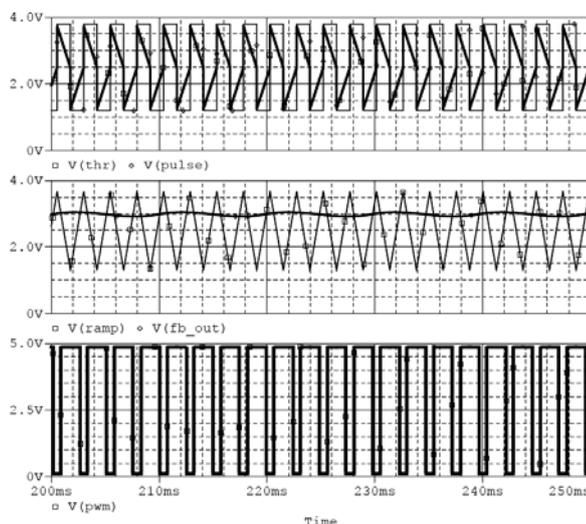


Рис. 13. Формирование сигналов в аналоговой части схемы управления

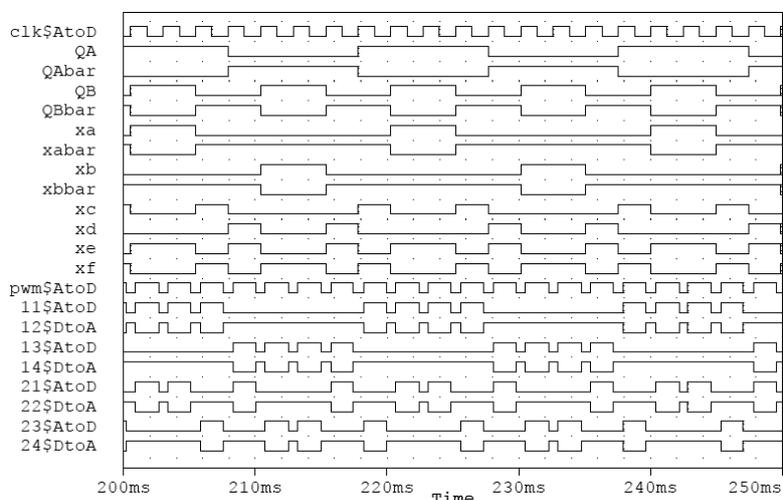


Рис. 14. Формирование сигналов управления силовыми ключами мостовых коммутаторов в цифровой части схемы управления

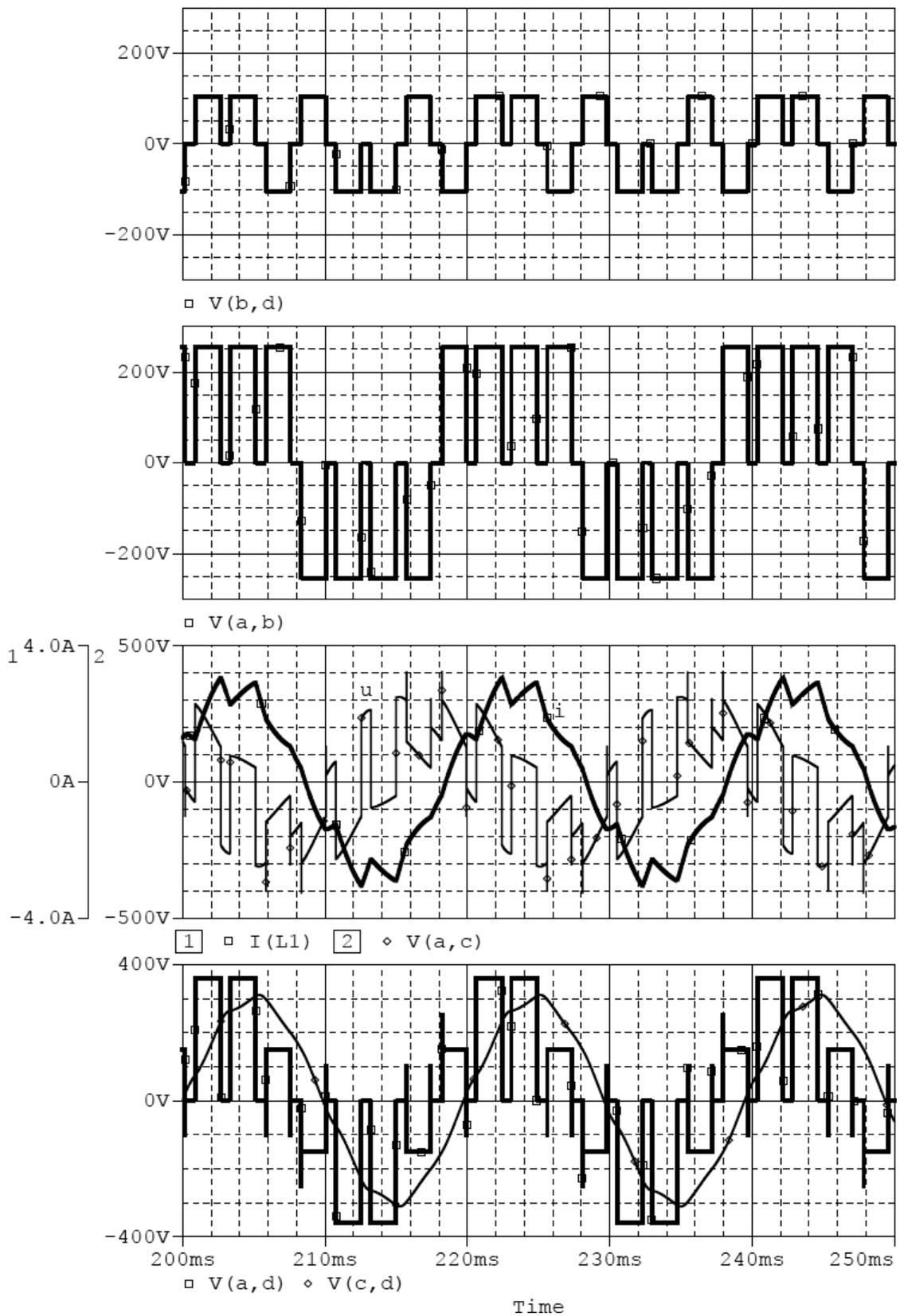


Рис. 15. Временные диаграммы процессов в силовой части инвертора номинальном режиме: напряжения, формируемые мостовыми коммутаторами (две верхние диаграммы); напряжение и ток дросселя выходного фильтра (ниже); напряжения на входе и выходе силового фильтра (внизу)

В ходе моделирования проверен целый ряд режимов работы инвертора в режиме ШИР-СТ-Х/р, что позволило полностью подтвердить результаты синтеза и анализа многоимпульсных напряжений на основе вейвлетный преобразований Хаара, а также методику расчета выходного фильтра инвертора с многоимпульсным напряжением на входе фильтра.

В пятой главе разработан алгоритма цифрового управления силовыми ключами мостового коммутатора и проведено компьютерное моделирование инвертора в режиме ШИР-СТ-Х/р с цифровым управлением.

Для реализации инвертора в режиме ШИР-СТ-Х/п использован 8-и битовый микроконтроллер PIC16F887, который выполнен по RISC-архитектуре, что позволяет использовать его в схеме управления многоуровневым инвертором.

Наиболее приемлемым для реализации режима ШИР-СТ-Х/п представляется использование внутреннего таймера контроллера. В этом случае в память данных заносятся в виде 0 и 1 состояния всех ключей мостовых коммутаторов (0 – ключ разомкнут, 1 – ключ замкнут). Период выходного напряжения разбивается на равные промежутки в соответствии с числом формируемых импульсов. Рассчитывается число тактовых импульсов ($p_{ти ном}$), которое должен отсчитать таймер для формирования длительности импульса при номинальном коэффициенте регулирования ($\delta_{М ном}$). В соответствии с сигналом обратной связи определенное число тактовых импульсов ($\Delta p_{т}$) будет добавляться, либо вычитаться из $p_{ти ном}$, т. е. текущие значения длительностей импульса и паузы будут определяться как

$$\begin{cases} p_{ти} = p_{ти ном} + \Delta p_{ти}, u_{вых} \downarrow \vee R_{н} \downarrow; \\ p_{ти} = p_{ти ном} - \Delta p_{ти}, u_{вых} \uparrow \vee R_{н} \uparrow, \end{cases} \quad (5.5)$$

где $u_{вых}$ – величина выходного напряжения; $R_{н}$ – сопротивление нагрузки.

Код паузы рассчитывается, как

$$p_{тп} = p_{т} - p_{ти}, \quad (5.6)$$

где $p_{т}$ – число тактовых импульсов, соответствующее периоду выходного напряжения. Такой способ расчета позволяет сохранять неизменным период выходного напряжения с точностью до одного тактового импульса.

Блок схема инвертора в режиме ШИР-СТ-Х/п показана на рис. 16.

В схеме рис. 16 устройство отрицательной обратной связи состоит из маломощного трансформатора обратной связи ($Tr_{ос}$), для обеспечения заданного уровня напряжения, подаваемого на вход операционного усилителя пик-детектора, измеряющего амплитуду выходного напряжения. С выхода пик-детектора аналоговый сигнал поступает на АЦП контроллера.

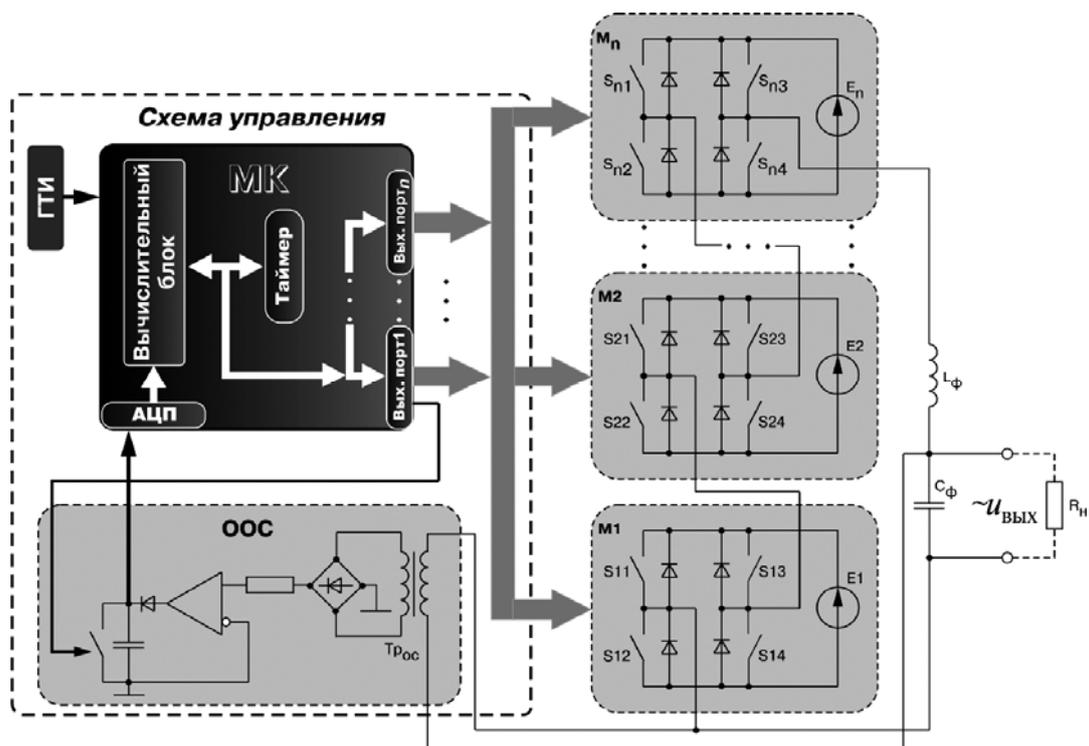


Рис.16. Блок-схема инвертора в режиме ШИР-СТ- X/n

В микроконтроллере происходит сравнение кода АЦП с эталонным и вычисляется необходимое значение Δp_t . Рассчитываются коды длительности импульса и паузы – $p_{ти}$ и $p_{тп}$. В регистр ввода/вывода загружается код состояния транзисторов, соответствующий первому интервалу периода выходного напряжения. По окончании счета по прерыванию таймера в регистры ввода/вывода загружается новый код состояния ключей мостовых коммутаторов, в таймер загружается код, соответствующий $p_{тп}$, и начинается отсчет паузы. По окончании периода выходного напряжения процесс повторяется.

Сигнал на считывание кода АЦП выдается на втором полупериоде выходного напряжения. По окончании считывания формируется сигнал на замыкание ключа для разряда конденсатора. После этого ключ снова размыкается начинается новый цикл работы пик-детектора.

Разработана схема модели инвертора в режиме ШИР-СТ- $X/2$ с цифровой схемой управления. Модель инвертора состоит из модели силовой части и модели схемы управления. Схема модели инвертора ШИР-СТ- $X/2$ с цифровым управлением приведена на рис. 17.

Схема модели силовой части состоит из двух однофазных мостовых коммутаторов $X1$ и $X2$, реализованных в виде иерархической схемы, питаемых от источников $V1$ и $V2$ соответственно, выходного фильтра LC-фильтра. С помощью мостовых коммутаторов формируется многоуровневое импульсное напряжение, подаваемое на вход силового фильтра, на выходе которого формируется синусоидальное напряжение, заданного качества.

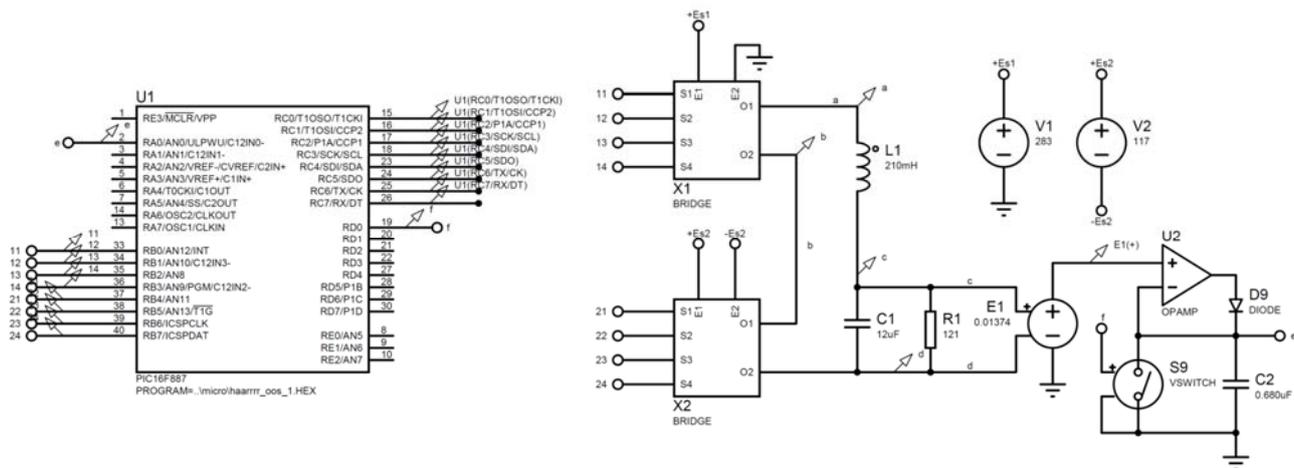


Рис. 17. Схема модели инвертора в режиме ШИР-СТ-Х/2 с микроконтроллерным управлением

Схема управления состоит из микроконтроллера PIC16F887 и устройства отрицательной обратной связи, состоящего из компаратора, диода, конденсатора и ключа, а также трансформатора, выполненного на основе источника напряжения управляемого напряжением. На вход устройства обратной связи подается часть выходного напряжения, снимаемая с маломощного трансформатора обратной связи. Аналоговый сигнал обратной связи преобразуется в цифровой код с помощью встроенного АЦП микроконтроллера. На выходных портах микроконтроллера формируются сигналы управления мостовыми коммутаторами рис. 18. Временные диаграммы процессов в силовой части инвертора при номинальном напряжении питания: напряжения, показаны на рис. 19.

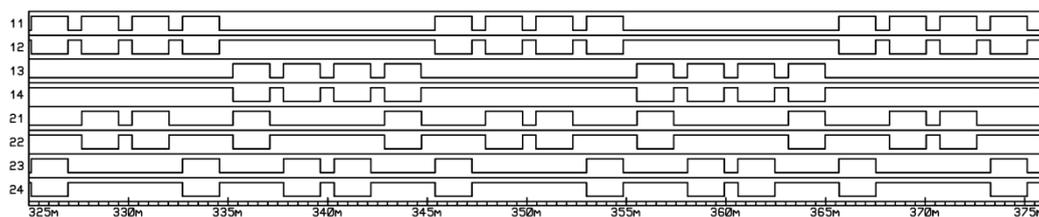
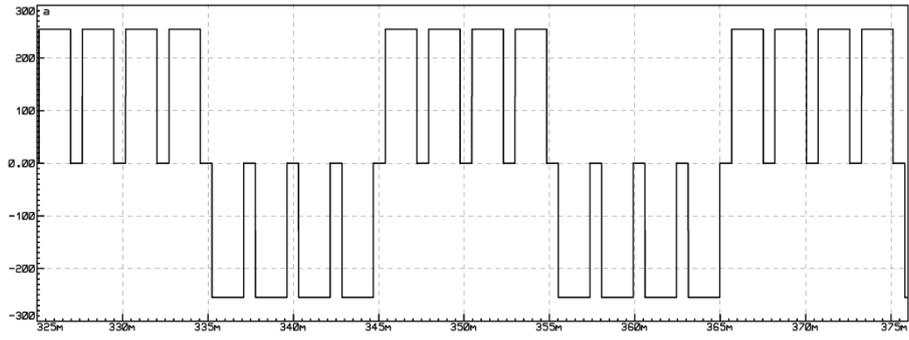
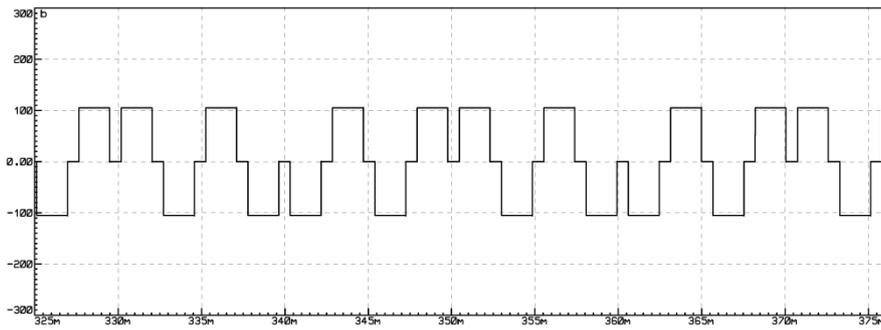


Рис. 18. Формирование сигналов управления силовыми ключами мостовых коммутаторов: при номинальном напряжении питания

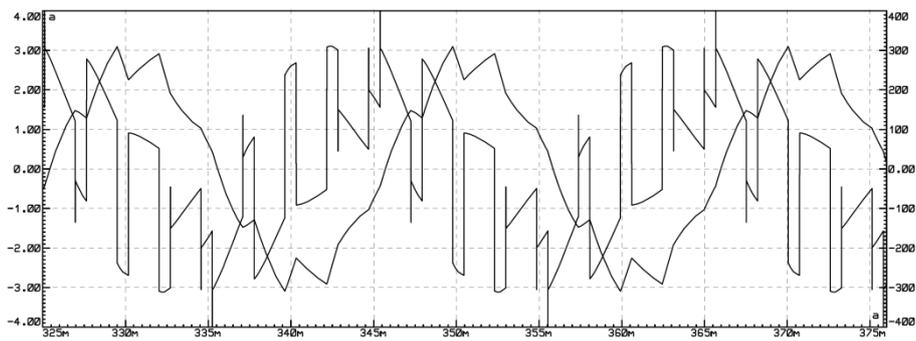
В ходе моделирования проверен целый ряд режимов работы инвертора в режиме ШИР-СТ-Х/2, что позволило полностью подтвердить результаты синтеза и анализа многоимпульсных напряжений на основе вейвлетных преобразований Хаара, а также подтвердило работоспособность предложенного алгоритма управления ключами мостовых коммутаторов.



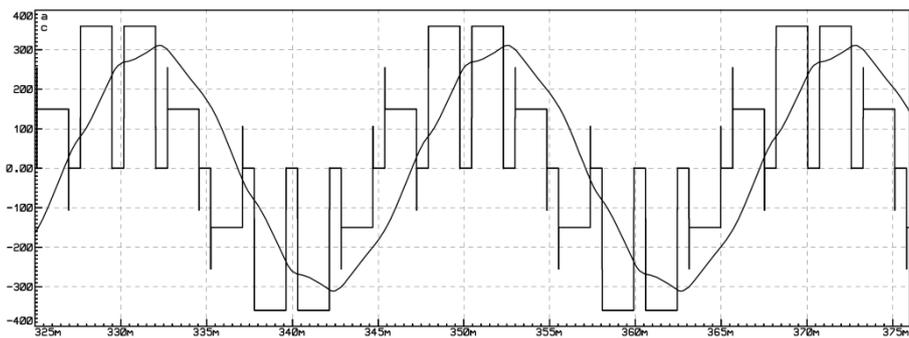
а



б



в



г

Рис. 19. Временные диаграммы процессов в силовой части инвертора при номинальном напряжении питания: напряжения, формируемые мостовыми коммутаторами (а) и (б); напряжение и ток дросселя выходного фильтра (в); напряжения на входе и выходе силового фильтра (г)

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В ходе диссертационной работы были получены следующие научные и практические результаты.

1. Выявлено, что простое увеличение числа импульсов за половину периода основной гармоники выходного напряжения инвертора практически не дает никакого выигрыша с точки зрения спектрального состава и способности импульсного напряжения к фильтрации;

2. Разработан метод синтеза ступенчато-импульсных напряжений на основе вейвлетных преобразований Хаара, с исключением высших гармоник, что позволило обеспечить снижение динамических потерь в силовой части инвертора за счет существенного снижения частоты коммутации силовых ключей;

3. Разработанный метод синтеза ступенчато-импульсных напряжений позволил существенно упростить реализацию таких напряжений цифровыми методами за счет равномерного расположения импульсов одинаковой длительности на периоде основной гармоники;

4. Разработана уточненная методика расчета выходного фильтра инвертора, позволяющая рассчитать параметры фильтра для любого многоимпульсного напряжения, аппроксимирующего синусоидальное;

5. Разработан алгоритм реализации цифрового управления инверторами со ступенчато-импульсным напряжением на входе силового фильтра;

6. Разработанные модели инвертора с цифро-аналоговым и полностью цифровым управлением и результаты моделирования позволили полностью подтвердить теоретические положения, разработанные в диссертации.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

По материалам диссертации опубликовано 7 статей.

В изданиях, рекомендованных перечнем ВАК, опубликовано 7 статей:

1. Анисимова, Т. В. Синтез многоуровневых импульсных напряжений с селективным исключением гармоник. / Т. В. Анисимова, В. И. Волков, В. В. Крючков. // Практическая силовая электроника. – 2013 г. – № 51. – с. 29.

2. Анисимова, Т. В. Транзисторный инвертор с многоуровневым напряжением на входе силового фильтра для бортовых и наземных систем электропитания / Т. В. Анисимова, В. И. Волков, В. В. Крючков. // Практическая силовая электроника. – 2013 г. – № 50. – с. 23.

3. Анисимова, Т. В. Синтез параметров ступенчатых напряжений с использованием вейвлетных преобразователей. / Т. В. Анисимова, В. И. Волков, В. В. Крючков. // Практическая силовая электроника. – 2012 г. – № 48. – с. 18.

4. Анисимова, Т. В. Расчет параметров фильтров инверторов с синусоидальным выходным напряжением. / Т. В. Анисимова, В. В. Крючков // Практическая силовая электроника. – 2012 г. – № 47. – с. 6.

5. Анисимова, Т. В. Сравнительный анализ многоимпульсных выходных напряжений инверторов. / Т. В. Анисимова, А. В. Бокунов, В. В. Крючков // Практическая силовая электроника. – 2012 г. – № 46. – с. 28.

6. Аверин, С. В. Синтез ступенчатых выходных напряжений с улучшенным спектральным составом инверторов систем электроснабжения летательных аппаратов. / С. В. Аверин, Т. В. Анисимова, А. Н. Данилина, В. В. Крючков. // Вестник Московского авиационного института. – 2010 г. – т. 17 №5.– С. 103.

7. Аверин, С. В. Сравнение способов оптимальной минимизации коэффициента гармоник и исключения гармоник с регулированием напряжения для инверторов с многоуровневым выходным напряжением / С. В. Аверин, Т. В. Анисимова, А. Н. Данилина, В. В. Крючков, Ю. Г. Следков // Практическая силовая электроника. – 2010. – № 1 (37). – С. 19.