

На правах рукописи



Щетинин Владимир Евгеньевич

## ОДНОФАЗНЫЕ ИНВЕРТОРЫ С МНОГОЯЧЕЙКОВОЙ СТРУКТУРОЙ

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

### АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва 2017

Работа выполнена на кафедре «Микроэлектронные электросистемы» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» МАИ.

Научный руководитель: **Аверин Сергей Владимирович**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Микроэлектронные электросистемы» МАИ.

Официальные оппоненты: **Лукин Анатолий Владимирович**, доктор технических наук, профессор, ЗАО «ММП-Ирбис», генеральный директор.

**Овчинников Денис Александрович**, кандидат технических наук, АО «Связь инжиниринг», первый заместитель генерального директора

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Защита диссертации состоится 27 декабря 2017 г. в 11 часов 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.125.07 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» МАИ по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, корп. «Г», ауд. 302 (кафедра 310).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Университета и на сайте <https://mai.ru/upload/iblock/66f/SHCHetinin-dissertatsiya-na-sayt-s-titulnym.pdf>

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.125.07



В.С. Степанов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Одна из важных тенденций в современных системах электроснабжения (СЭС) – рост мощности, потребляемой электрооборудованием. Это связано с ростом числа потребителей, таких как управляющие системы; системы, обеспечивающие питание устройств обработки, хранения и передачи информации; системы обеспечения безопасности, бесперебойности питания и комфортабельных условий работы.

На подвижных объектах параметры питания бортовых систем могут существенно отличаться от параметров первичной СЭС. Для обеспечения питания целого ряда устройств бортового оборудования во вторичной СЭС необходимо наличие инвертора, согласующего эти параметры. Инверторы, входящие в состав СЭС, предназначены для преобразования напряжения постоянного тока первичного источника в переменное с заданным качеством, определяемым величиной коэффициента гармоник и необходимой точностью регулирования выходного напряжения.

В настоящее время потребность в инверторах постоянно растет. В производственных и коммерческих СЭС они используются как самостоятельные устройства систем электропитания, а также в качестве преобразователей в сложных и модульных устройствах. К таким устройствам относятся источники бесперебойного питания, силовые электронные регуляторы электродвигателей, преобразователи частоты. Инверторы широко применяются в составе СЭС, использующих в качестве первичных источников альтернативные источники электроэнергии.

Помимо вышесказанного, на борту летательного аппарата (ЛА) с помощью инверторов обеспечивается резервное питание при отказе основного канала СЭС переменного тока для питания нагрузок первой категории, без которых невозможно безопасное завершение полёта. При этом в авиации вопросы увеличения мощности питания бортового оборудования стоят более остро, в силу ограничений по массе и габаритам. В то же время, развитие концепции самолета с повышенным уровнем электрификации оборудования (СПУЭО) требует наличия во вторичной СЭС инвертора еще большей мощности, чем в традиционных автономных объектах.

Создание инверторов для перспективных СЭС на основе альтернативных источников энергии, например, ветроэнергетических установок и солнечных энергетических станций, мощность которых находится в диапазоне 2–5 МВт.

Проблемам теории инверторов посвящены труды таких ученых как Г.С. Зинovieв, Ю.И. Конев, Г.М. Малышков, Е.В. Машуков, А.В. Лукин, В.И. Мелешин, Г.С. Мыщык, С.Б. Резников, Е.Е. Чаплыгин, Д.А. Шевцов, В.С. Моин, С.Ф. Коняхин, В.В. Крючков и других специалистов.

Одно из направлений разработки и проектирования инверторов – построение инвертора по принципу многоячейковой структуры, позволяющему увеличить выходную мощность и улучшить качество выходного напряжения. Многоячейковый инвертор создается на основе однофазных регулируемых инверторов, представляющих собой отдельные ячейки. Использование многопоточного принципа позволит равномерно распределить мощность нагрузки по отдельным ячейкам инвертора, а соответствующий алгоритм управления позволит улучшить качество выходного напряжения.

Многоячейковая структура позволит наращивать выходную мощность инвертора, повысить отказоустойчивость, многоячейковый инвертор предполагает повышение экономической эффективности, поскольку единожды разработанная ячейка, оптимальная по стоимости, позволит создавать инвертор с мощностью, определяемой только первичным источником питания.

Существующие алгоритмы управления силовыми ключами многоячейковых инверторов не учитывают возможностей современных цифровых микроконтроллеров в схемах управления инверторами.

Применение микропроцессорного управления позволяет существенно расширить возможности применения сложных алгоритмов управления силовыми ключами для обеспечения лучших характеристик, как по выходной мощности, так и по качеству выходного напряжения, уменьшения массогабаритных показателей выходных фильтров и общей миниатюризации устройства с применением современных полупроводниковых приборов.

При решении задачи увеличения мощности многоячейкового инвертора дополнительным ограничением выступает процесс замены импортной элементной базы в рамках программы импортозамещения.

Таким образом, увеличение мощности инверторов требует решений, реализующих многопоточное преобразование энергии, а, следовательно, задача поиска функциональных и схемотехнических решений и разработка алгоритмов управления силовыми ключами инвертора с многоячейковой структурой на отечественной элементной базе, является актуальной задачей.

**Цели и задачи работы.** Цель работы – исследование и разработка возможных структурных решений, а также разработка алгоритмов управления силовыми ключами инвертора, позволяющих увеличить мощность канала вторичной СЭС на основе многоканального преобразования электрической энергии при заданном качестве выходного переменного напряжения с использованием существующих импортозамещающих компонентов.

Достижение поставленной цели требует решения следующих задач:

1. Исследование известных структурных, функциональных и схемотехнических решений, способов и алгоритмов формирования выходных напряжений однофазных инверторов.

2. Разработка принципа формирования выходного напряжения и алгоритма управления ключами СПЯ многоячейкового инвертора для обеспечения равной нагруженности каждой ячейки.
3. Разработка схемы силовой преобразовательной ячейки (СПЯ) и их соединения (параллельного и последовательного) для обеспечения равной нагруженности ячеек.
4. Разработка имитационной компьютерной модели для анализа процессов в многоячейковом инверторе.
5. Разработка принципиальной схемы макета для подтверждения принятых алгоритмических и схемотехнических решений.

**Объект исследования.** Класс преобразователей напряжения постоянного тока в однофазное напряжение переменного тока с многоячейковой структурой для вторичных СЭС.

**Предмет исследования.** Изучение процессов в многоячейковых инверторах в статических и переходных режимах и формирование алгоритмов, позволяющих повысить допустимую выходную мощность инвертора с заданным качеством выходного напряжения при реализации на современной отечественной элементной базе.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач в диссертационной работе использовались аналитические методы теории электрических цепей, электротехники, математического анализа и концепция многоячейковой структуры инверторов.

Для проведения математических расчетов параметров исследуемого инвертора применялся программный пакет MathCAD.

Исследование рабочих процессов разрабатываемого инвертора проводилось с применением имитационного компьютерного моделирования в программном пакете OrCAD версии 16.6.

**Научная новизна.** При решении задач, поставленных в диссертационной работе, получены следующие научные результаты:

1. Проведена систематизация известных структур однофазных инверторов и их режимов работы, выявлены структуры, допускающие возможность использования для построения многоячейковых инверторов, обоснована недостаточная эффективность многоячейкового инвертора с суммированием токов ячеек.
2. Разработана методика расчета углов переключения силовых ключей многоячейкового инвертора для формирования выходного напряжения при нечетном и четном числе СПЯ, обеспечивающая их равную нагруженность.
3. Предложено при расчете углов переключения с четным числом СПЯ, как дополнительное условие расчета для обеспечения равной нагруженности использование коэффициента аппроксимации амплитуды.

4. Предложен алгоритм формирования выходного напряжения многоячейкового инвертора при условии равной нагруженности каждой ячейки инвертора.

**Практическая значимость работы.** В ходе исследовательской работы получены следующие практические результаты:

1. Подтверждена работоспособность предложенного алгоритма формирования выходного напряжения многоячейкового инвертора.
2. Разработана компьютерная модель многоячейкового инвертора со структурой равно нагруженных ячеек при аппроксимации выходного напряжения по синусоидальному сигналу.
3. Разработаны алгоритм и программа формирования сигналов управления ключами ячеек многофазного инвертора на основе микроконтроллера.
4. Предложено схемотехническое решение многоячейкового инвертора на основе анализа современной отечественной элементной базы как реализации тенденции импортозамещения.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Сопоставительная оценка структур однофазных инверторов, позволяющая провести выбор структур, допускающих возможность использования для построения многоячейковых инверторов.
2. Методика расчета углов переключения силовых ключей многоячейкового инвертора для формирования выходного напряжения при нечетном и четном числе СПЯ, обеспечивающая их равную нагруженность.
3. Алгоритм формирования выходного напряжения многоячейкового инвертора по предложенной методике расчета углов переключения силовых ключей СПЯ с учетом дополнительного условия расчете при четном числе ячеек.
4. Имитационная компьютерная модель многоячейкового инвертора, позволяющая провести исследование процессов в установившихся и переходных режимах и подтвердить работу СПЯ с равной нагруженностью ячеек.
5. Программа формирования сигналов управления ключами ячеек многоячейкового инвертора.

**Достоверность полученных результатов.** Основные положения и результаты, полученные в диссертационной работе, проверены путем сопоставления результатов, полученных ИКМ в среде OrCAD 16.6. с экспериментальной проверкой основных принципов работы многоячейкового инвертора по предложенному алгоритму на разработанном макете.

**Реализация результатов работы.** Результаты диссертационной работы использованы в НИР кафедры (№46800-03060 и №51990-01060), а также в

учебном процессе на кафедре 306 «Микроэлектронные электросистемы» Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

**Апробация результатов.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

1. XII Международной конференции «АВИАЦИЯ И КОСМОНАВТИКА – 2013»
2. XIV Международной конференции «АВИАЦИЯ И КОСМОНАВТИКА – 2015»
3. Международной молодёжной научной конференции «XLII Гагаринские чтения» – 2016
4. Международной молодёжной научной конференции ««XLIII Гагаринские чтения»» – 2017

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликовано 4 научные работы, из них 3 работы – в изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией для апробации кандидатских и докторских диссертаций.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, списка иллюстративного материала и приложений. Работа изложена на 137 страницах текста, содержит 91 рисунок.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** дана краткая характеристика работы, обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, представлены научная новизна и практическая ценность работы, положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведен анализ существующих структурных, функциональных и схемотехнических решений построения однофазных инверторов; наибольшее распространение при разработке современных инверторов при однопоточном преобразовании нашла структура, приведенная на Рисунке 1.

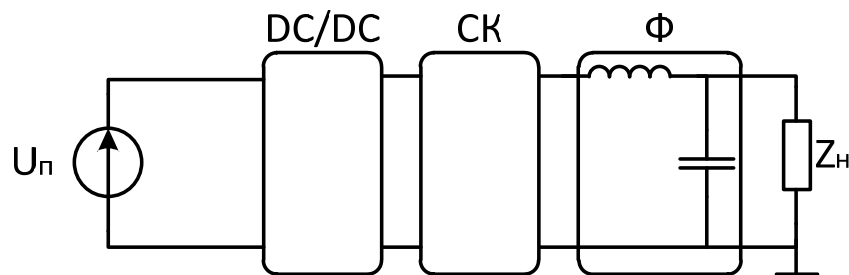


Рисунок 1– Структура инвертора с согласующим конвертером в качестве устройства согласования входного и выходного напряжения

$U_p$  – источник питания, DC/DC – конвертер, СК – силовой каскад, Ф – фильтр,  $Z_n$  – нагрузка инвертора

Для снижения массо-габаритных показателей инвертора напряжение на выходе СК (при любой его структуре) должно быть с уменьшенным содержанием высших гармоник.

Рассмотрены известные режимы формирования выходного напряжения на основе импульсной модуляции для улучшения спектра выходного напряжения на входе силового фильтра ШИМ с синусоидальным опорным напряжением, ШИМ со ступенчатым опорным напряжением, оптимизированная ШИМ, полуоптимизированная ШИМ, ШИР–КД.

Для оценки эффективности передачи мощности в нагрузку, рассмотренных при анализе режимов ШИМ проведен расчет масс составных частей инвертора, показано, что основная часть массы и габаритов устройства зависят от массы и габаритов трансформатора конвертора (DC/DC), выходного фильтра и теплоотводов.

$$m_{\text{и}} = m_{\text{L}} + m_{\text{C}} + m_{\text{DC}} + m_{\text{T}},$$

где  $m_{\text{L}}$ ,  $m_{\text{L}}$ ,  $m_{\text{C}}$ ,  $m_{\text{DC}}$ ,  $m_{\text{T}}$  – массы дросселя и конденсатора выходного фильтра, DC/DC преобразователя и теплоотвода (радиатора).

Массы фильтра и трансформатора DC/DC конвертора существенно снижаются с ростом частоты коммутации силовых транзисторов. Масса радиаторов зависит от тепла, выделяемого в силовых ключах конвертора и инвертора, и растет с ростом частоты коммутации. Поскольку частоты работы DC/DC конвертора и частота формирования напряжения силового каскада инвертора различны, то при расчете масс разбивается на две составляющие – расчет массы DC/DC конвертора и расчет элементов охлаждения. В главе приведен алгоритм и программа расчета. Расчет нагрузок силовых транзисторов проводился с помощью имитационного компьютерного моделирования, для этого была разработана компьютерная модель, с передачей данных в программу расчета масс.

На Рисунке 2 показана зависимость массы инвертора в зависимости от режима ШИМ. Во всех случаях масса конвертора одинакова по принятым допущениям и определяется оптимальной частотой импульсного напряжения одинаковой для различных режимов ШИМ. Рост массы инверторов с частотой обусловлен более значительным ростом динамических потерь и, как следствие, увеличение массы радиаторов. Характер зависимостей для различных режимов ШИМ аналогичен, что объясняется общей тенденцией роста частоты для исключения большего числа низших из высших гармоник из спектра формируемого напряжения (характеризует снижение массы фильтра), а также одинаковым характером зависимости динамическим потерь, что обуславливает рост массы радиаторов.



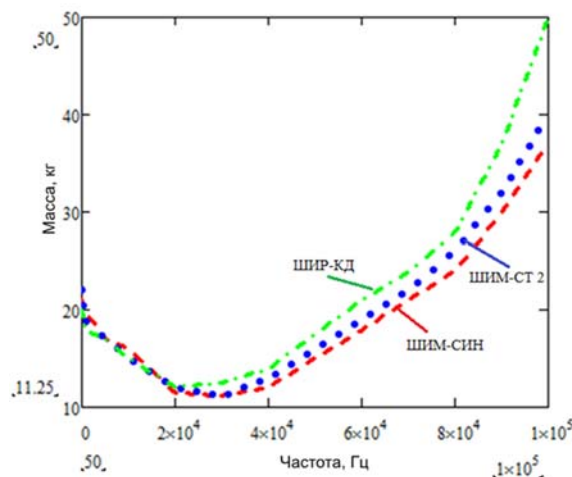


Рисунок 2 – Зависимость расчетной массы инвертора от частоты переключения при различных способах формирования

Таким образом, при однопоточном преобразовании общая масса инвертора существенно растет, что усугубляется более высокими значениями паразитных параметров силовых транзисторов и условиями отвода тепла с ростом мощности.

Более широкие возможности открывает работа инвертора с однотипными силовыми преобразовательными ячейками работающих на общую нагрузку с заданным фазовым сдвигом относительно друг друга с суммированием по току или по напряжению.

Проведено компьютерное моделирование известных методов формирования выходного напряжения, выявлены возможности увеличения выходной мощности инвертора с многоячейковой структурой для существующих алгоритмов и отмечены их недостатки.

**Во второй главе** рассмотрены методы построения инвертора с суммированием токов силовых преобразовательных ячеек (СПЯ). Проведено компьютерное моделирование схем распределения токов нагрузки многоячейкового инвертора с различным фазовым сдвигом ячеек.

Поскольку в СПЯ используется LC-фильтр, то в пределе в точке суммирования СПЯ с дросселем на выходе может быть представлена синусоидальным источником тока. Тогда суммарный ток нагрузки может быть определен как:

$$I_{\Sigma} = I_m \sum_{i=1}^N \sin(\omega t + \varphi_i) = \frac{\sin\left(\frac{N\varphi}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\varphi}{2}\right)} \sin\left[\omega t + (N-1)\frac{\varphi}{2}\right]. \quad (1)$$

На Рисунке 3 приведены графики зависимости амплитуды суммарного тока нагрузки. При разном числе ячеек в зависимости от сдвига фаз между ячейками. Полученные результаты наглядно показывают, что максимальный выходной ток инвертора возможен при совпадении фаз токов ячеек.

Но при этом, обеспечение равномерного распределения нагрузки между ячейками крайне затруднительно.

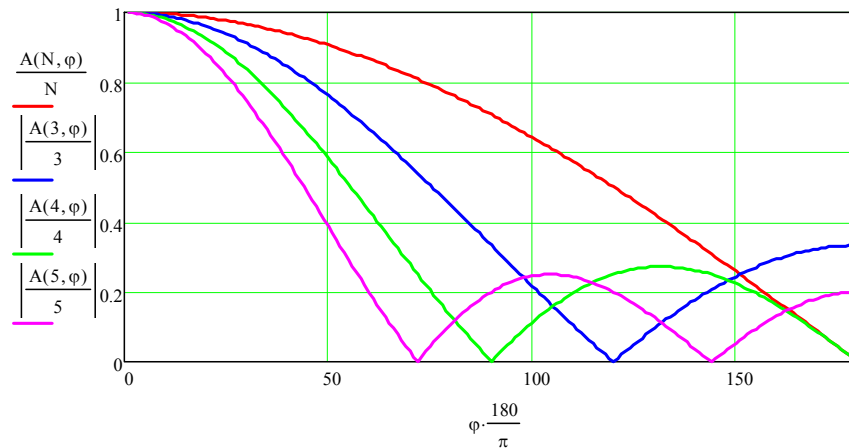


Рисунок 3 – Зависимость амплитуды суммарного тока от сдвига фаз, нормированное относительно числа ячеек

Проведен анализ проблем при организации работы ячеек при нулевом сдвиге фаз.

При наличии фазового сдвига (как равномерного, так и оптимального) большая часть проблем отсутствует. А увеличивая число пилообразных сигналов и число ячеек, можно добиться значительного снижения частоты коммутации транзисторов с относительно высокой частоты формирования фронтов выходного напряжения. Для регулирования выходного напряжения используются методы ШИМ. При этом опорный сигнал остается единым, а пилообразный сигнал каждой ячейки имеет соответствующий фазовый сдвиг. Таким образом, каждая ячейка работает с собственной фазой ШИМ сигналов.

Однако анализ режимов работы показал, что при таком управлении возможно возникновение токов, протекающих в обход нагрузки, что значительно снижает эффективность передачи мощности в нагрузку. Структура отличается от традиционных схем параллельного включения напряжения.

Структура силовой части многоячейкового инвертора с параллельным подключением СПЯ к источнику постоянного напряжения изображена на Рисунке 4. В соответствии с ней разработана компьютерная модель для исследования процессов в инверторе. В качестве примера исследован инвертор, состоящий из трех ячеек, при равномерном фазовом сдвиге.

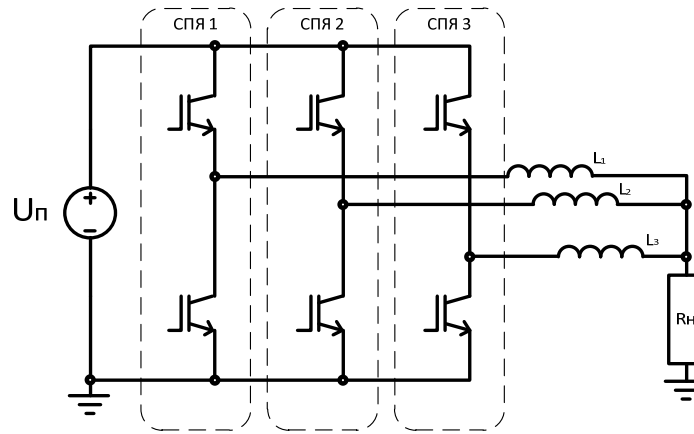


Рисунок 4 – Схема моделируемого инвертора с трехуровневым выходным напряжением

Рассмотрим порядок коммутации ключей с пересечением включения верхних и нижних ключей ячеек инвертора на предмет возникновения токов, протекающих в обход нагрузки.

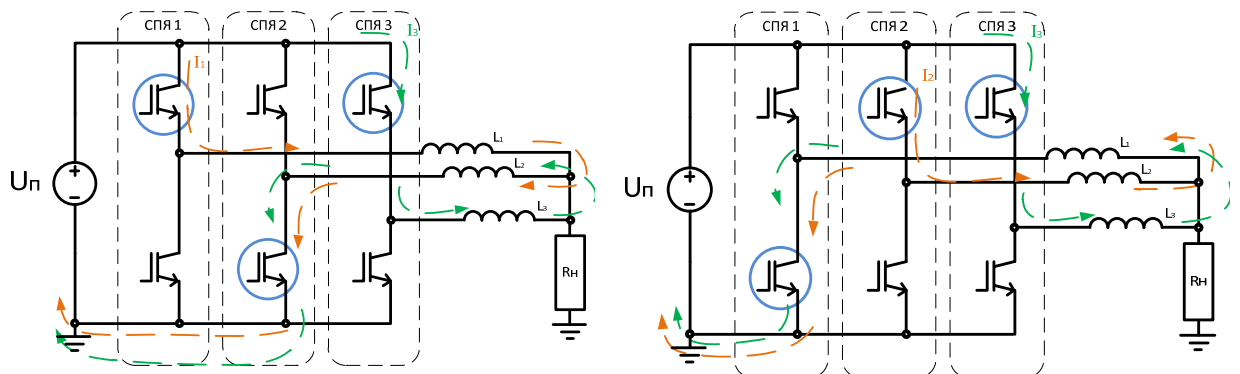


Рисунок 5 – Возникновение контуров протекания токов в обход нагрузки при перекрестной коммутации нижних и верхних ключей ячеек инвертора

Из приведенных схем видно, что контуры протекания токов в обход нагрузки могут возникать в схеме при включении одновременно любой комбинации верхних и нижних ключей инвертора. На Рисунке 5 токи обходного контура отмечены индексами  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ . С увеличением сопротивления нагрузки, токи обходного контура в разы превышают ток нагрузки.

Одним из возможных вариантов исключения токов обходного контура является внедрение дополнительной транзисторной стойки и дифференциация работы нижних и верхних ключей ячеек инвертора.

Недостаток схемы с дополнительной стойкой – неполное распределение нагрузки между ячейками инвертора. На Рисунке 6 изображено разделение тока нагрузки между активными в данный момент ячейками.

В случае равномерного сдвига фаз ячеек инвертора ток нагрузки на единичной ячейке инвертора может достигать полного тока нагрузки. Такая схема становится неактуальной, несмотря на возможности формирования выходного ступенчатого напряжения.

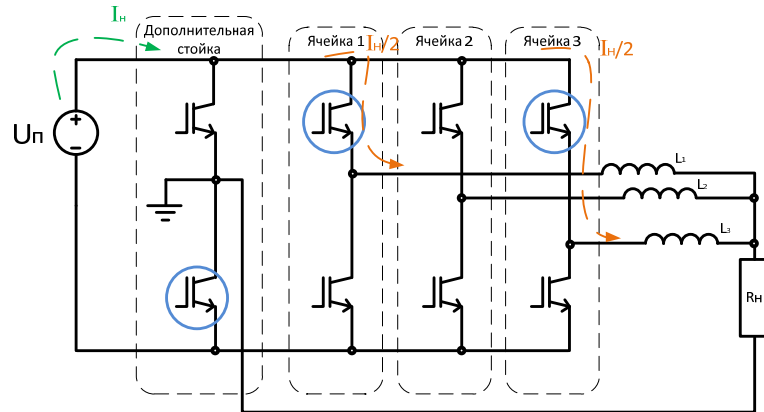


Рисунок 6 – Протекание тока нагрузки через активные ячейки

Для обеспечения разделения нагрузки по отдельным ячейкам и формирования ступенчатой формы выходного напряжения инвертора при параллельном подключении ячеек к источнику постоянного напряжения пригодны структуры инверторов с использованием дросселей-трансформаторов. Такие структуры подробно рассмотрены в литературе, но ввиду перемагничивания на основной частоте сети имеют повышенную массу и габариты в сравнении с бестрансформаторными схемами.

**В третьей главе** рассмотрены методы построения инвертора с суммированием напряжений (СПЯ), предложен алгоритм формирования напряжения на выходе многоячейкового инвертора при суммировании напряжений с равной загруженностью ячеек

На Рисунке 7 приведен порядок работы ячеек инвертора, обеспечивающий их равномерную загрузку независимо от их числа. Заштрихованные области соответствуют интервалам работы верхних ключей полумостовых схем, а незаштрихованные – нижних.

В разработанном алгоритме моделируемый сигнал представляет собой многоуровневую аппроксимацию синусоидального сигнала. Аппроксимированный сигнал имеет амплитуду идентичную опорной синусоиде и описывает синусоиду по ее амплитуде.

Исходя из числа силовых ячеек инвертора, необходимо определить моменты переключения уровней напряжения как  $Y_{1A} = \sin\alpha_1$ . Из условия равенства уровней напряжения  $Y_{A1} = Y_{A2}, \dots, Y_{AN}$  определяем моменты переключения как точки пересечения последующих заданных уровней аппроксимирующего напряжения с опорной синусоидой на первой четверти периода.

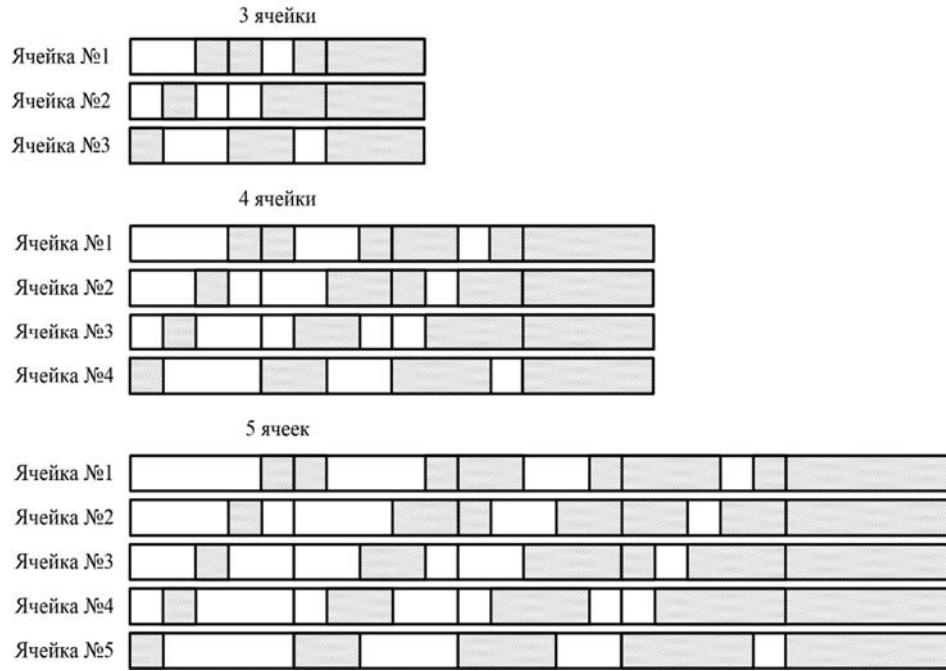


Рисунок 7 – Порядок работы ячеек инвертора

В случае нечетного числа ячеек, значения уровней напряжения определяются по следующей формуле:

$$Y_{A_i} = \frac{\frac{N}{2} - i}{\frac{N}{2}}, \quad (2)$$

где  $N$  – число ячеек инвертора,

$i = 0 \dots N$  – порядковый номер уровня напряжения.

Точки пересечения синусоидального сигнала и аппроксимирующего определяются по формуле:

$$\alpha_i = \arcsin \frac{\frac{N}{2} - i}{\frac{N}{2}}. \quad (3)$$

На Рисунке 8 изображены линии пересечения уровней напряжения и опорного синусоидального напряжения. В качестве примера рассмотрим инвертор, состоящий из трех ячеек. В этом случае возможны следующие уровни напряжения:  $-1, -1/3, 1/3, 1$ .

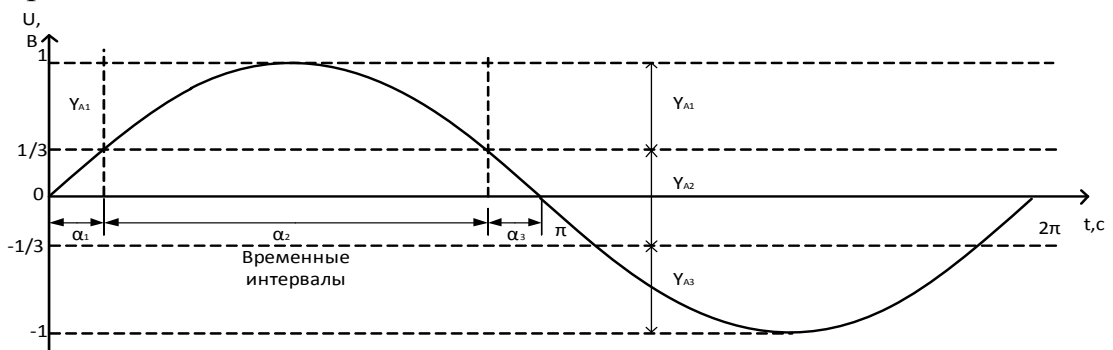


Рисунок 8 – Формирование аппроксимирующего напряжения

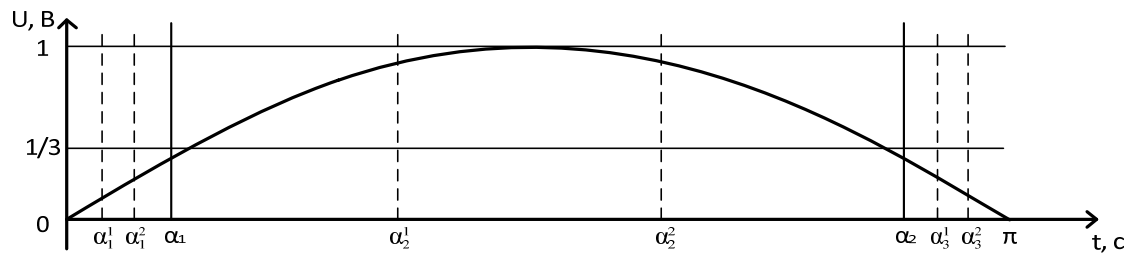
Для обеспечения равномерной нагрузки всех ячеек инвертора каждый временной интервал формирования уровня аппроксимирующего напряжения разбивается на равные субинтервалы по количеству ячеек инвертора.

Моменты переключения силовых ключей ячеек инвертора определяются по следующей формуле:

$$\alpha_i^j = \frac{\alpha_{i+1} - \alpha_i}{N} + \alpha_{i-1}^j, \quad (4)$$

где  $j = 1 \dots N$  – порядковый номер субинтервала уровня напряжения.

На Рисунке 9 показано разбиение интервалов на субинтервалы для определения моментов переключения силовых ключей ячеек инвертора.



Временные субинтервалы

Рисунок 9– Разбиение уровней напряжения по времени включения каждой ячейки, исходя из числа ячеек

На Рисунке 10 приведена диаграмма переключения силовых ключей инвертора и суммарный аппроксимирующий сигнал. На первом интервале сумма напряжений всех ячеек равна одной трети входного напряжения, на втором – входному напряжению, на третьем – опять одной трети входного напряжения и т.д.

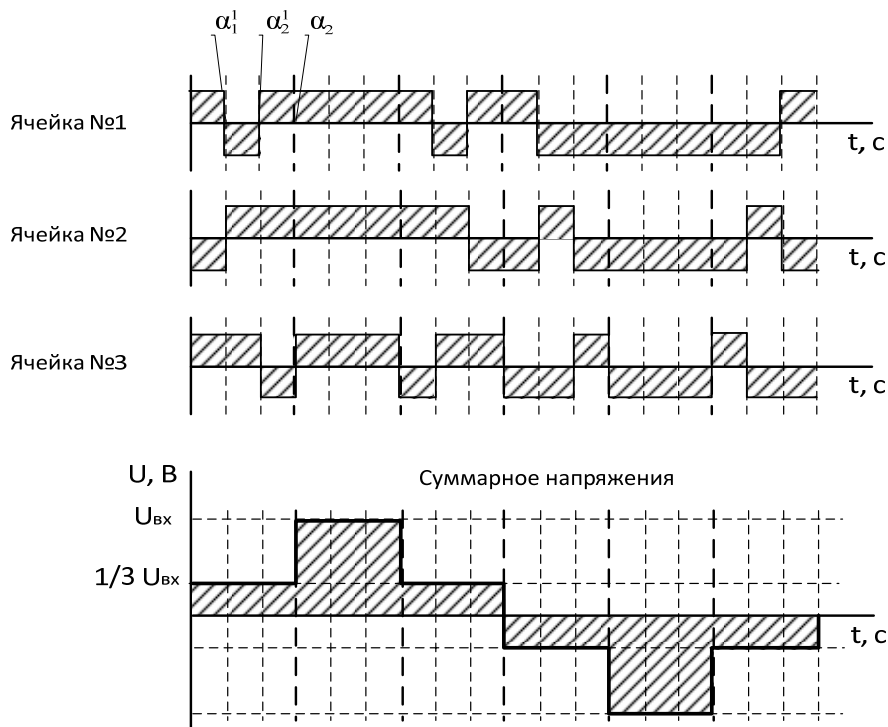


Рисунок 10 – Алгоритм переключения ключей ячеек на каждом уровне напряжения

В случае четного числа ячеек, происходит смещение амплитуды сигнала аппроксимации относительно максимального уровня опорной синусоиды. Величина амплитуды напряжения аппроксимации  $Y_A$  рассчитывается из условия максимума отношения площадей под кривой аппроксимирующего сигнала и кривой опорного синусоидального сигнала на половине периода рассматриваемой функции как:

$$\gamma = \frac{S_A}{S_{\sin}}, \quad (5)$$

где  $S_A$  – площадь под кривой аппроксимации;

$S_{\sin}$  – площадь под опорным синусоидой

Задаваясь числом ячеек и значением угла переключения первого уровня аппроксимирующего напряжения  $\alpha_1 > 0$ , вычисляем амплитуду первого уровня аппроксимирующего напряжения как  $Y_{1A} = \sin\alpha_1$ . Из условия равенства уровней напряжений  $Y_{2A} = 2Y_{1A}$ , ...,  $Y_{NA} = NY_{1A}$  и ограничении  $Y_A = \sum Y_{NA} < 1$ , определяем углы переключения как точки пересечения последующих заданных уровней аппроксимирующего напряжения с опорной синусоидой на первой четверти периода. Затем вычисляем величину площади под кривой аппроксимирующего напряжения. Последовательным приближением находим максимум отношения (3.8) и соответствующую  $Y_A$ .

В качестве примера рассмотрим инвертор, состоящий из четырех ячеек. Согласно (4),  $\gamma = 0,72$  при  $Y_A = 0,8$ .

Точки пересечения синусоидального и аппроксимирующего сигналов определяются по формуле:

$$\alpha_i = \arcsin \frac{Y \left( \frac{N}{2} - i \right)}{\frac{N}{2}}, \quad (6)$$

где  $N$  – число ячеек инвертора,

$i = 0 \dots N$ .

На Рисунке 11 изображены линии пересечения уровней напряжения и опорного синусоидального напряжения.

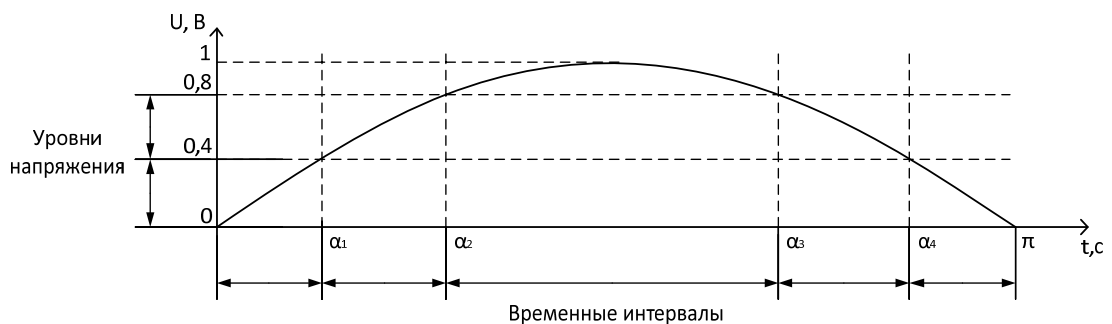


Рисунок 11 – Формирование аппроксимирующего напряжения

Моменты переключения силовых ключей ячеек инвертора определяются по следующей формуле:

$$\alpha_i^j = \frac{\alpha_{i+1} - \alpha_i}{N} + \alpha_{i-1}^j, \quad (6)$$

где  $j = 1 \dots N$  – порядковый номер субинтервала уровня напряжения.

На Рисунке 12 показано разбиение интервалов на субинтервалы для определения моментов переключения силовых ключей ячеек инвертора.

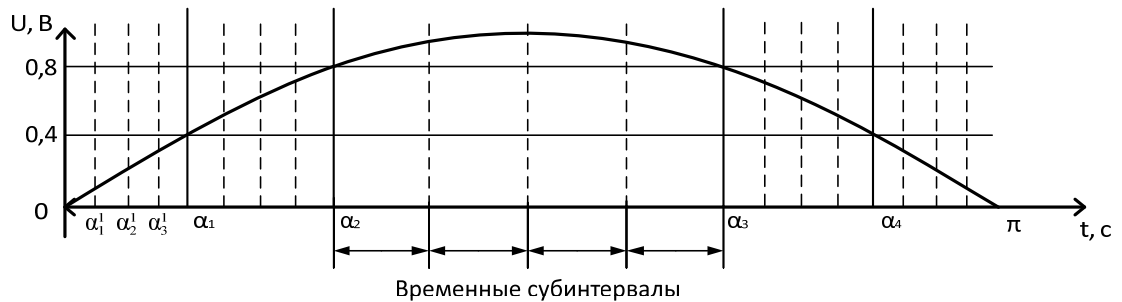


Рисунок 12 – Разбиение уровней напряжения по времени включения каждой ячейки, исходя из числа ячеек

На Рисунке 13 приведена диаграмма переключения силовых ключей инвертора и суммарный аппроксимирующий сигнал. На первом интервале сумма напряжений всех ячеек равна нулю, на втором интервале сумма напряжений равна половине входного напряжения, на третьем – входному напряжению и так далее.

На Рисунке 14 представлена общая модель многоячейкового инвертора. Все результаты были получены в рамках этой модели, варьировались число ячеек, алгоритм формирования выходного напряжения, использование ШИМ и выходного фильтра.

Результаты моделирования представлены на Рисунках 15 – 17.

Выходное напряжения инвертора с нечетным числом силовых ячеек характеризуется более широкой вершиной формы сигнала, обусловленной тем, что при расчетах моментов переключения аппроксимируемый сигнал описывает опорную синусоиду, а не вписывается внутрь ее, как в случае с четным числом ячеек.



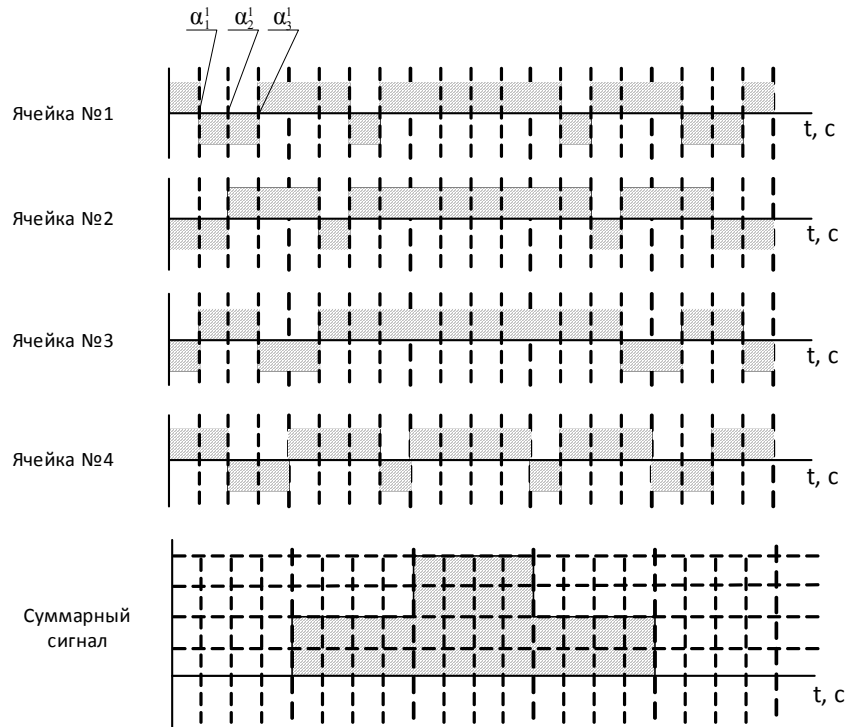


Рисунок 13 – Алгоритм переключения ключей ячеек на каждом уровне напряжения

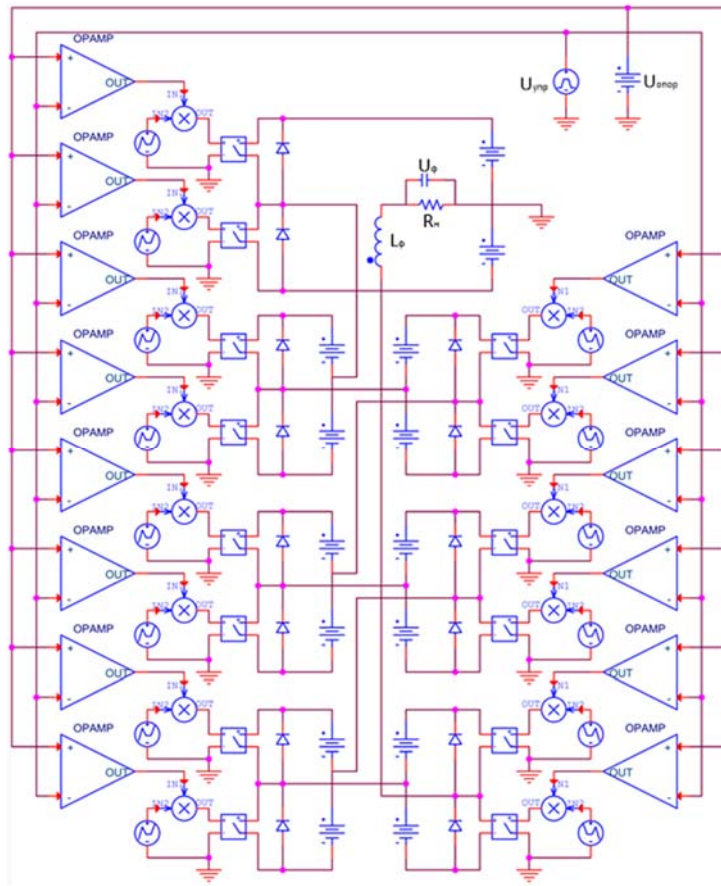


Рисунок 14 – Компьютерная модель многоячейкового инвертора с ШИМ регулированием

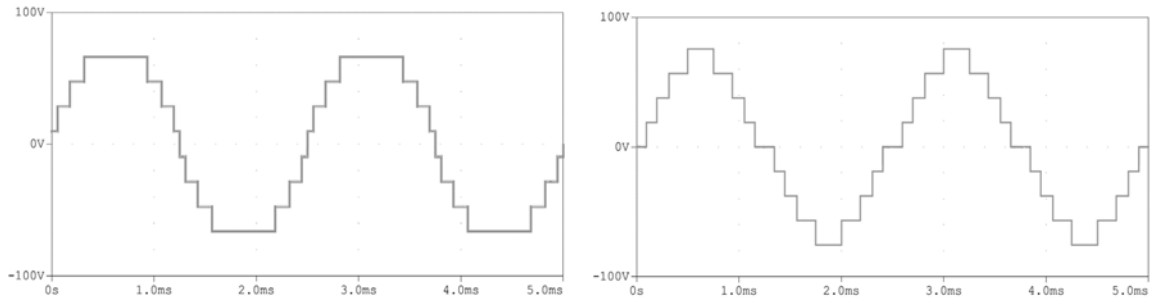


Рисунок 15– Выходное напряжение многоячейкового инвертора на входе фильтра с нечетным -7 и четным -8 числом ячеек

При моделировании напряжений, представленных на Рисунках 16 и 17, применялись фильтры с одинаковыми параметрами. Спектральный анализ полученных напряжений показывает меньшее значение третьей и пятой гармоник в случае моделирования инвертора с семью ячейками.

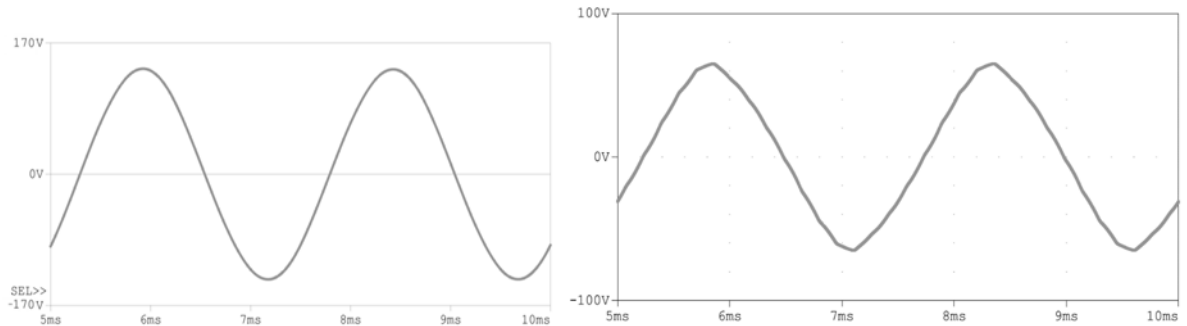


Рисунок 16 – Напряжение на выходе фильтра с применением фильтра при разных  $k_p$

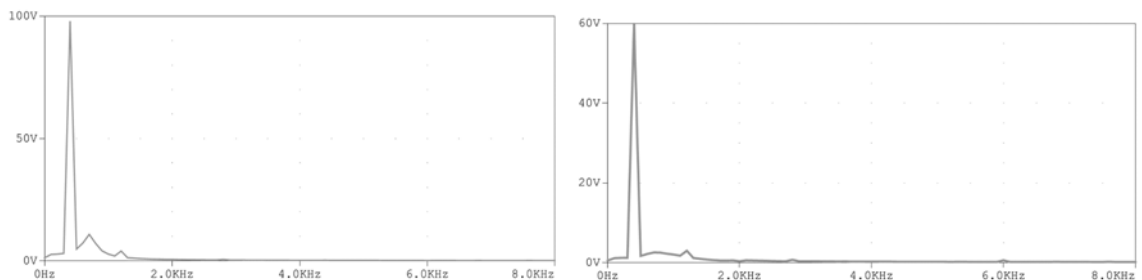


Рисунок 17 – Спектральный состав напряжения на выходе фильтра при разных  $N$

Расчет масс компонентов инвертора и их сравнение показывает, что использование многоячейковых инверторов в сочетании с предложенным алгоритмом управления дает возможность получить меньшую рассеиваемую мощность в силовых транзисторах и уменьшить массу пассивных реактивных элементов силового сглаживающего фильтра. При увеличении числа совместно работающих СПЯ создаются условия уменьшения габаритов инвертора в целом за счет уменьшения значений  $L$  и  $C$ , а также равного распределения нагрузки по СПЯ.

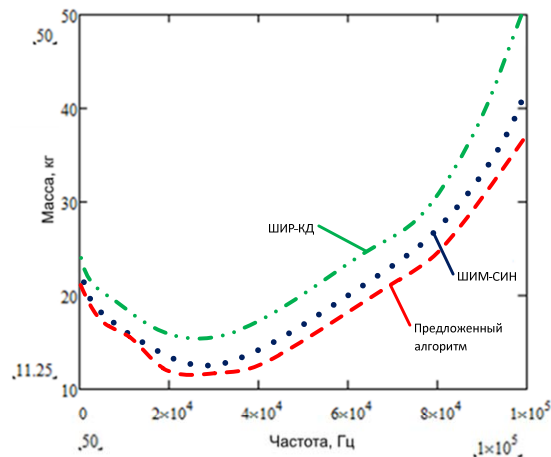


Рисунок 18 – Расчет массы четырех–ячейкового инвертора

**В четвертой главе** описана практическая реализация способа формирования выходного напряжения многоячейкового инвертора с суммированием напряжений ячеек.

Для проверки основных теоретических положений диссертации и достоверности проведенного моделирования разработан, изготовлен и отлажен макет многоячейкового инвертора с мощностью каждой ячейки 3 кВА. При практической реализации макета инвертора решены следующие задачи: определены структуры силовой части инвертора в соответствии с заданной мощностью и схемы управления, реализующей разработанный алгоритм формирования и регулирования выходного напряжения, позволяющий обеспечить заданное качество и устранить постоянную составляющую выходного напряжения.

Структурная схема многоячейкового инвертора, реализующего разработанный алгоритм, представлена на Рисунке 33. Питание инвертора осуществляется от лабораторного источника постоянного напряжения. Поскольку расчет моментов переключения требует высоких затрат процессорного времени и большой объем памяти, принято решение разместить заранее сформированный массив данных о состоянии ключей СПЯ и моментов переключений в постоянное запоминающее устройство (ПЗУ) – энергонезависимую память.

Структурная схема многоячейкового инвертора, показана на Рисунке 19, содержит: конвертор (DC/DC) для питания силовой части инвертора, четыре СПЯ (СПЯ), микроконтроллер (ПУ) для формирования управляющих импульсов на ключи СПЯ, распределитель импульсов (РИ) подающий сигналы на управляющие драйверы ключей СПЯ, таймер микроконтроллера (Т) для отсчета моментов переключения ключей, энергонезависимая память (ПЗУ), содержащая массив данных о состоянии ключей СПЯ и моментов переключений, вычислительный модуль микроконтроллера (ВМ), обеспечивающий регулирование моментов переключений, аналого–цифровой преобразователь (АЦП) для обработки сигнала, поступающего от датчика напряжений (ДН), выходной фильтр (ВФ), нагрузка (Н).

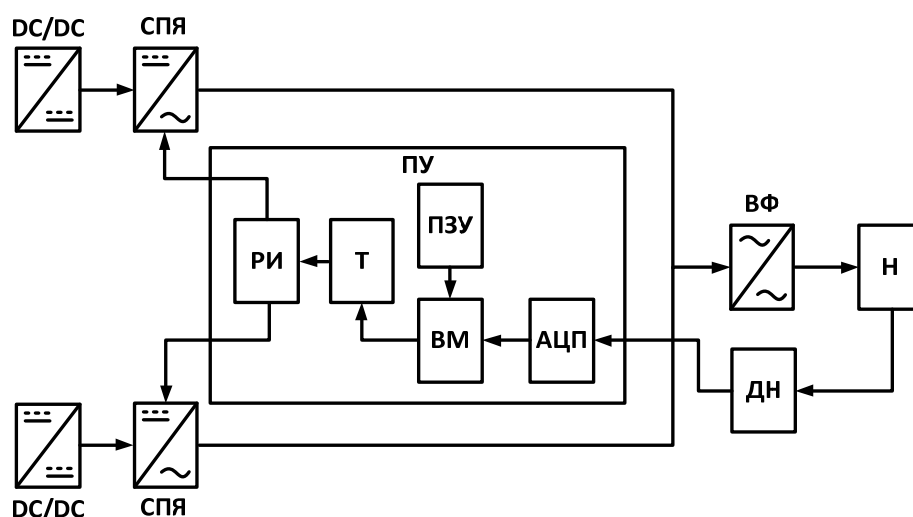


Рисунок 19 – Структурная схема многоячейкового инвертора

*Выбор компонентов.* В рамках решения поставленной задачи реализации многоячейкового инвертора на отечественной элементной базе, компоненты, применяемые в лабораторном макете, производятся в России.

*Транзистор.* Основным компонентом силовой части проектируемого многоячейкового инвертора выбран IGBT транзистор производства АО «Воронежский Завод Полупроводниковых Приборов – Сборка» 2E901A. Данный транзистор выбран исходя из величин тока и напряжения, требуемых для тестируемой модели.

*Драйвер управления транзистором.* Драйвера выбран 249АП1Р (5П158) производства АО «Протон» г. Орел. Данный драйвер удовлетворяет характеристикам, необходимым для подачи управляющих импульсов IGBT транзистору.

*Процессор управления инвертором.* В качестве процессора управления был выбран микроконтроллер 1886BE5У производства АО "ПКК Миландр". Он обладает необходимыми ресурсами для обработки алгоритма управления силовыми ключами СПЯ и достаточным количеством выходов для управления каждым драйвером силового ключа.

*Дроссели.* Дроссели, изготовленные на основе материала МП–140, так как такие сердечники обладают низкими величинами потерь и высокой стабильностью индуктивности после намагничивания большим током.

*Лабораторный макет.* Макет многоячейкового инвертора построен на четырех ячейках с применением алгоритма управления и использованием микропроцессорного управления ключами СПЯ.

Тестирование проводилось с питанием от лабораторного стенда типа ТЕС. Питание преобразователя осуществлялось от сети постоянного тока с номинальным напряжением +/- 200В с дифференциальным питанием полумостов СПЯ инвертора. Выходное напряжение инвертора – 115 В. Нагрузка –

нагревательные элементы и резистивно–индуктивная, как имитатор обмотки электрической машины.

В процессе проведения испытаний лабораторного макета удалось достичь мощности ячейки инвертора в 3 кВА. Максимальная мощность сборки составила, соответственно, 12 кВА.

Несмотря на заявленные производителем характеристики, расчетной мощности 5 кВА на единичную ячейку достичь не удалось. При повышении тока свыше 25 ампер температура силовых ключей начинала расти, несмотря на наличие пассивного радиатора даже при использовании активного воздушного охлаждения. Величина теплового сопротивления от кристалла к радиатору не позволяет быстро передавать большое количество тепла для отвода от кристалла

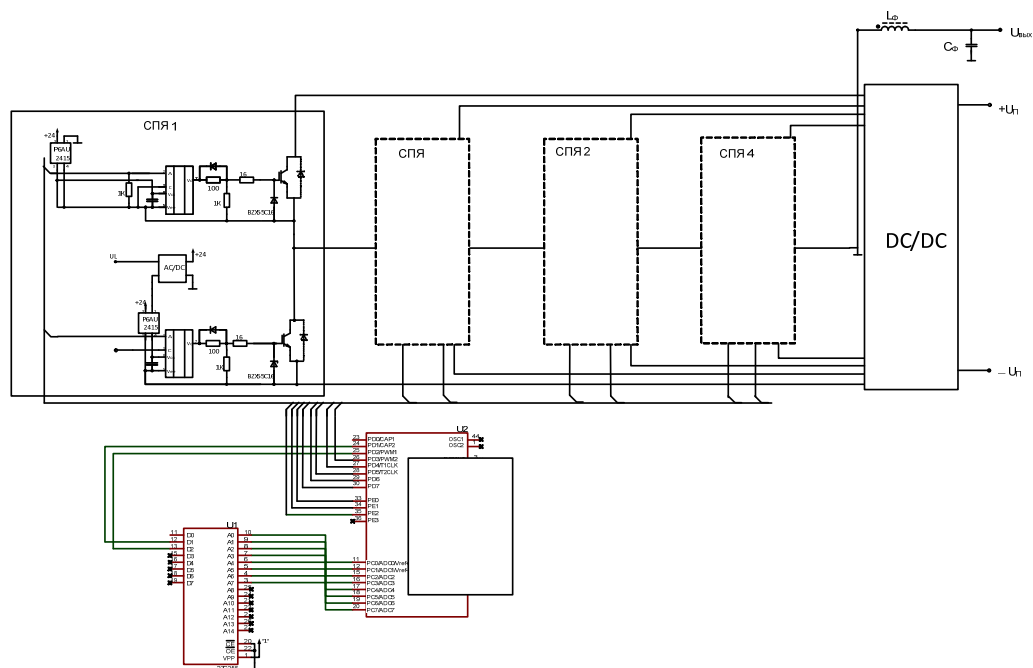


Рисунок 20 – Принципиальная схема макета многоячейкового инвертора

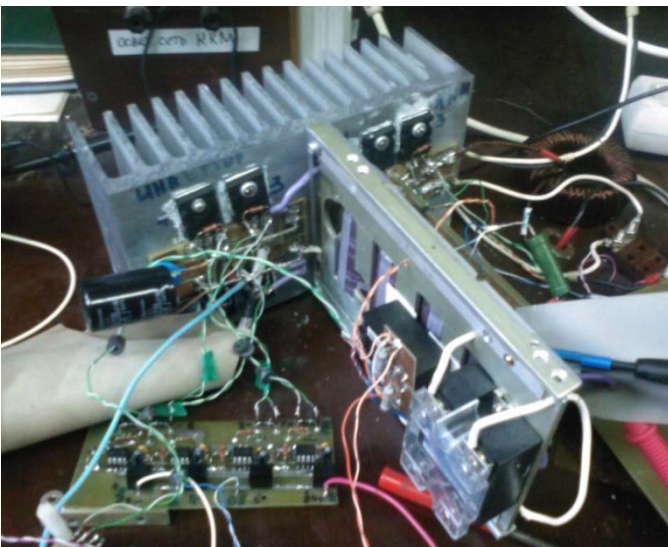


Рисунок 21 – Общий вид макета инвертора

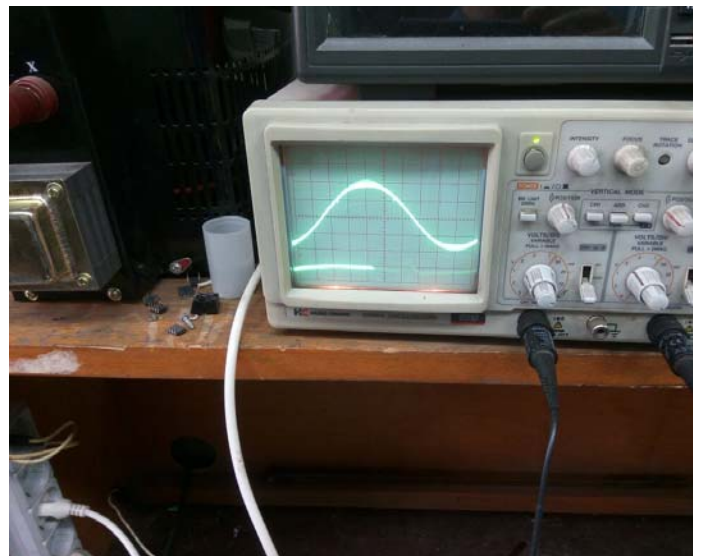


Рисунок 22 – Напряжение на выходе макета инвертора

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения диссертационной работы получены следующие научные и практические результаты:

1. Поведен анализ известных структурных, функциональных и схемотехнических решений, способов и алгоритмов формирования выходных напряжений однофазных инверторов. Выявлены их достоинства и недостатки дана их сопоставительная оценка, позволяющая провести выбор структур, допускающих возможность использования для построения многоячейковых инверторов. Показано, что применение микропроцессорного управления позволит улучшить показатели по сравнению с существующими методами.

2. Проведен анализ принципов формирования выходного напряжения и разработана методика расчета углов переключения силовых ключей многоячейкового инвертора для формирования выходного напряжения при нечетном и четном числе СПЯ, обеспечивающая их равную нагруженность.

3. Предложен алгоритм формирования выходного напряжения многоячейкового инвертора по предложенной методике расчета углов переключения силовых ключей СПЯ с учетом дополнительного условия расчете при четном числе ячеек.

4. Разработана компьютерная модель, позволяющая исследовать эффективность предложенной методики. Проведен анализ и исследование параметров многоячейкового инвертора в установившихся и переходных режимов при равной нагруженности ячеек.

5. Разработана программа формирования сигналов управления ключами ячеек многоячейкового инвертора на базе цифровой микроконтроллерной схемы управления для четного и нечетного числа ячеек, обеспечивавшая равную нагруженность ячеек.

6. Проведен анализ современной отечественной элементной базы для реализации многоячейкового инвертора, исходя из особенностей его строения. Разработаны схемотехнические решения, позволяющие реализовать многоячейковый инвертор, удовлетворяющий требованиям импортозамещения.

7. Разработан макет инвертора. Показана работоспособность многоячейкового инвертора с предложенным алгоритмом работы ключей СПЯ.

8. Результаты диссертационной работы в части исследования результатов имитационного и компьютерного моделирования переходных и установившихся режимов в инверторах вторичной СЭС, были использованы в НИР, а также использованы в учебном процессе кафедры 306 «Микроэлектронные электросистемы» МАИ, что подтверждено актами о внедрении в НИР и учебный процесс.

**Основные положения диссертации опубликованы в работах:  
Статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК:**

1. Щетинин В. Е., Аверин С. В. Алгоритм формирования выходного напряжения многофазного инвертора с синусоидальной аппроксимацией включения ячеек // Вестник Московского авиационного института. 2015. Т.22. №4. С. 159-167.
2. Щетинин В. Е., Аверин С. В. Алгоритм управления силовыми ключами многоячеечного инвертора в режиме ШИМ // Практическая силовая электроника. 2016. №62. С 35 – 43.
3. Щетинин В.Е. Сравнительный анализ формирования многоячейковых инверторов при четном и нечетном числе силовых ячеек // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т.23. №3. С. 165-174.

**Другие печатные издания:**

4. Щетинин В.Е. Моделирование однофазного инвертора с многоячейковой структурой // Двенадцатая международная конференция «АВИАЦИЯ И КОСМОНАВТИКА – 2013». Тезисы докладов. 2013. С. 524-525.
5. Щетинин В.Е. Широтно импульсная модуляция выходного напряжения многофазного инвертора с синусоидальной аппроксимацией включения ячеек // Четырнадцатая международная конференция «АВИАЦИЯ И КОСМОНАВТИКА – 2015». Тезисы. 2015. С. 224-226.
6. Щетинин В.Е. //XLII Международная молодёжная научная конференция «Гагаринские чтения - 2016». Сборник тезисов докладов. 2016.Т.1.С. 667-668
7. Щетинин В.Е. Сравнительный анализ методов формирования синусоидального выходного напряжения многоячейкового инвертора // XLIII Международная молодёжная научная конференция «Гагаринские чтения - 2017». Тезисы докладов. 2017. С 964-965.
8. Щетинин В.Е. Формирование напряжения однофазного инвертора с многоканальной структурой силовых ячеек // Электропитание. 2015. №1. С. 45-51.