

На правах рукописи



Баховцев Игорь Анатольевич

**АНАЛИЗ И СИНТЕЗ ЭНЕРГООПТИМАЛЬНЫХ СПОСОБОВ
УПРАВЛЕНИЯ ИНВЕРТОРАМИ С ШИМ**

Специальность 05.09.12 – силовая электроника

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Новосибирск – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный консультант -
доктор техн. наук, профессор **Зиновьев Геннадий Степанович**

Официальные оппоненты:

Томашевский Юрий Болеславович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой системотехники ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина», г. Саратов.

Михальченко Сергей Геннадьевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой промышленной электроники ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» г. Томск.

Поляков Владимир Николаевич, д-р техн. наук, профессор кафедры электропривода и автоматизация промышленных установок ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени Первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург.

Ведущая организация - ФГАОУ ВО "Сибирский федеральный университет", г. Красноярск.

Защита состоится 22 декабря 2017 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.298.05 при ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск, пр-т Ленина, 76, ауд. 1007.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» и на сайте ЮУрГУ <https://www.susu.ru/ru/dissertation/d-21229805/bahovcev-igor-anatolevich>

Автореферат разослан «_____» _____ 2017 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, гл. корпус, Ученый совет ЮУрГУ, тел./факс: +7 (351) 267-91-23.

E-mail: grigorevma@susu.ac.ru

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.298.05
д-р техн. наук, доц.



М.А. Григорьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Современное промышленное производство характеризуется целым рядом тенденций, накладывающих жесткие требования на условия его реализации. К ним, в первую очередь, относится рост энергоемких технологий, происходящий в условиях возрастающей сложности получения энергии и дефиците доступных энергоресурсов. В связи с этим важнейшими задачами, стоящими перед промышленностью и наукой, являются разработка и производство менее энергоемких электроустановок, широкое внедрение энергосберегающих технологий, повышение КПД энергопроизводящего, энергопреобразующего и энергопотребляющего оборудования.

Одним из путей решения данных задач является повышение эффективности преобразования электроэнергии (ЭЭ) полупроводниковыми преобразователями (ПП), через которые, например, в наиболее развитых странах, проходит более 60%, а в РФ - порядка 40 % вырабатываемой электроэнергии. Широкое применение данных устройств, часто называемых в данном контексте **энергосберегающим** преобразовательным оборудованием, сегодня считается одним из эффективных направлений энергосберегающих технологий.

Требуемое повышение уровня преобразуемой мощности в электроприводе нашло свое отражение в разработке многофазных двигателей переменного тока и в переходе к высокому напряжению питания двигателей. В СЭ это инициировало разработку и исследование многофазных и многоуровневых топологий ПП, а также способов их управления.

Среди ПП широкое распространение, благодаря своим характеристикам, получили автономные инверторы (АИ) напряжения и тока, преобразующие электроэнергию постоянного тока в энергию переменного тока. Они нашли применение в регулируемом электроприводе, в системах генерирования электричества как автономного, так и централизованного уровня, в транспорте, возобновляемой энергетике и т.д.

АИН и АИТ, выполняя один и тот же тип преобразования ЭЭ, обладают в то же время разными свойствами, которые носят дуальный характер, что говорит о наличии между ними дополнительных общих свойств. Однако дуальность слабо освещена в отечественной технической литературе по СЭ, и редко используется на практике. Поэтому данный вопрос требует своего исследования с целью более широкого использования принципа дуальности при анализе и разработке АИ.

Важным этапом в развитии силовой электроники (СЭ) стало появление на электронном рынке мощных силовых полностью управляемых полупроводниковых приборов, по своим свойствам приближающихся к идеальным ключам: транзисторов *IGBT* и *MOSFET* и запираемых тиристоров *GTO* и *IGCT*. Это позволило кардинально улучшить технические характеристики ПП и способствовало решению проблемы создания энергоэффективных преобразователей ЭЭ, в частности АИН и АИТ.

Другим важным вкладом электронной промышленности в совершенствование ПП стали разработка и выпуск высокопроизводительных микроконтрол-

леров, относящихся к классу «*Motion Control*» . Имея в своем составе цифровой сигнальный процессор и специализированные ШИМ-модули, они существенно упростили реализацию алгоритмов управления преобразователем и энергетической системой (например, электроприводом) в целом.

Разработка многоуровневых топологий на базе современных быстродействующих ключей коснулось и АИ, что привело к улучшению формы их выходного сигнала, позволило уменьшить частоту коммутации вентилях и массогабаритные показатели выходных фильтров, использовать (для АИН) технологически отработанные ключи среднего класса напряжения и т.д. Все это говорит о перспективности многоуровневых АИ, об их широком применении в настоящем и будущем в различных отраслях производства и, соответственно, об актуальности научно-исследовательских работ, направленных на повышение их энергоэффективности.

Энергоэффективность преобразования ЭЭ автономными инверторами характеризуется, прежде всего, качеством входной и выходной энергии, определяющим дополнительные активные потери от высших гармоник напряжения и тока во входных цепях и нагрузке инвертора, а также потерями в самом АИ. Уменьшение указанных потерь повышает КПД системы в целом и является важным показателем повышения энергоэффективности данного преобразователя. Другим важным показателем эффективности работы АИ является степень использования напряжения питания, определяющая максимальный уровень мощности, отдаваемой в нагрузку. Данные вопросы к настоящему времени полностью решены еще не в достаточной степени, и исследования в данном направлении являются актуальными.

Энергетические характеристики АИ во многом определяются способами его управления, среди которых в настоящее время доминирующим принципом стала широтно-импульсная модуляция (ШИМ). В связи с этим разработка и анализ новых способов ШИМ постоянно является темой многих исследований, а современные требования, предъявляемые к АИ с точки зрения повышения энергоэффективности, делают вопрос разработки новых энергооптимальных (в заданном смысле) способов ШИМ еще более востребованным.

Большинство существующих способов ШИМ получено эвристическим путем с использованием элементов анализа. В то же время в области проектирования способов управления, параллельно существует иной, формальный путь синтеза. Однако, несмотря на реализованную в них оптимальность, синтезированные способы имеют целый ряд недостатков, ограничивающих их широкое применение. Это говорит о том, что вопрос синтеза новых энергоэффективных способов ШИМ до настоящего времени окончательно не решен, и исследования в данном направлении являются перспективными.

Лавинообразное увеличение числа способов управления, усиленное появлением многоуровневых и многофазных топологий, привело в настоящее время к накоплению большого количества информации о способах ШИМ и их влиянии на характеристики управляемых ими АИ. Это привело к усложнению процедуры сравнения способов и выбора из них того, который наиболее полно от-

вечает заданным требованиям. Выходом из этой ситуации может быть комплексный, системный подход к обобщению имеющейся информации, включающий (в условиях современных требований к преобразованию ЭЭ в АИ) энергетический аспект, позволяющий выявить как отличительные, так и общие свойства способов ШИМ. Эти свойства должны выражаться соответствующими энергетическими характеристиками (показателями), позволяющими адекватно, с учетом многих факторов производить сравнительный экспресс-анализ способов ШИМ. Все это должно быть подкреплено аналитическим описанием общих и отличительных характеристик способов ШИМ (через показатели АИ), что требует дальнейшего развития методов анализа и расчета энергетических показателей инверторов с целью получения указанных обобщенных и индивидуальных соотношений (желательно в замкнутом виде).

Описанный выше обобщенный анализ должен также внести свой вклад и в теорию ШИМ применительно к силовой электронике. В разное время в ее разработку и становление, в частности посредством анализа входных и выходных характеристик ПП, управляемых различными видами ШИМ, внесли большой вклад отечественные и зарубежные специалисты: Е.И. Усышкин, Л.И. Сетюков, А.С. Сандлер, Ю.М. Гусяцкий, А.В. Кобзев, Г.С. Зиновьев, О.Г. Булатов, С.П. Гладышев, Е.Е. Чаплыгин, С.А. Харитонов, В.А. Добрускин, А.Ю. Рождественский, В.Е. Тонкаль, В.И. Олещук, В.М. Михальский, Д. Б. Изосимов, В.М. Берестов, S.R. Bowes, J. Holtz, H.S. Patel, R.G. Hoft, D.G. Holmes, T. Lipo, M. Kazmierkowski, A.M. Nava, A. Iqbal и многие другие.

Однако на современном этапе развития СЭ, характеризующемся наличием большого количества топологий АИ и СПУ, ужесточением требований к ПП, актуальным и необходимым является проведение теоретических и экспериментальных исследований, направленных на единое и комплексное решение задач, ориентированных на повышение энергетической эффективности автономных инверторов с ШИМ различного применения.

Цель работы и задачи исследования. Целью диссертационной работы является повышение энергетической эффективности преобразования электрической энергии автономными инверторами с ШИМ на основе развития методов анализа и аналитического обобщенного исследования энергетических характеристик, развития критериев оценки их энергоэффективности, унификации описания работы и управления автономных инверторов в соответствии с принципом дуальности и на этой основе синтеза эффективных способов управления по заданным энергетическим критериям.

Для достижения данной цели в процессе работы были поставлены и решены следующие задачи:

1. Разработка единой методики расчета входных и выходных энергетических характеристик многофазных многоуровневых автономных инверторов напряжения и тока с ШИМ на основе анализа особенностей протекающих в них электромагнитных процессов и принципа дуальности.

2. Разработка и аналитическое описание критериев и условий сравнительного анализа способов ШИМ на основе комплексного учета факторов, определяющих энергетическую эффективность автономных инверторов.

3. Проведение обобщенного анализа энергетических характеристик многофазных многоуровневых автономных инверторов, управляемых различными способами ШИМ, с выводом соотношений в замкнутом виде. Обобщение полученных результатов с целью расширения представлений о ШИМ в СЭ.

4. Выбор критериев оптимальности, разработка методики синтеза, а также собственно синтез способов управления ШИМ по заданным критериям и их сравнение с существующими способами.

5. Разработка компьютерных моделей, позволяющих анализировать характеристики инверторов, управляемых синтезированными и существующими способами управления, и оценить адекватность методики расчета.

6. Анализ процессов управления в автономных инверторах тока с целью унификации реализации ШИМ в системах управления АИН и АИТ.

7. Разработка алгоритмов и рекомендаций по микропроцессорной реализации синтезированных способов ШИМ для управления автономными инверторами напряжения и тока.

8. Практическое использование результатов исследования в проектировании промышленных полупроводниковых преобразователей и в учебном процессе.

Методы исследования. Решение поставленных задач потребовало использования прямых методов анализа энергетических показателей полупроводниковых преобразователей, аппарата коммутационных функций, методов интегрального и спектрального анализа, теории бесконечных и конечных рядов, методов численной оптимизации и компьютерного моделирования.

Научная значимость и новизна диссертационной работы:

1. Предложена концепция множественности форм представления способов управления АИ, каждая из которых позволяет по-своему оценить характеристики и/или возможности способа управления, и которые предложено назвать **моделями** способов управления.

2. Предложено автономные инверторы тока и напряжения на основе принципа дуальности формально рассматривать как единый, унифицированный класс вентильных преобразователей с однократным преобразованием электроэнергии постоянного тока в энергию переменного тока, для которых характерны однотипные способы управления и аналитические выражения, описывающие входные и выходные переменные.

3. Разработана единая методика расчета качества электроэнергии инверторов, позволяющая вывести аналитические соотношения для действующего значения и коэффициента гармоник входных и выходных переменных в общем случае многоуровневых автономных инверторов с ШИМ. В основе методики лежит свойство импульсов всех входных и выходных переменных модулироваться по длительности в соответствии с виртуальным «линейным (межфазным) модулирующим сигналом».

4. Выведены обобщенные аналитические соотношения для действующего значения и коэффициента гармоник выходного напряжения m -фазного L -уровневого АИН, управляемого различными способами ШИМ, справедливые и для дуальных переменных АИТ.

5. Сформулирован «принцип подобия способов», позволяющий адекватно, с единых позиций сравнивать способы ШИМ как по входным, так и по выходным характеристикам.

6. Предложен новый показатель оценки эффективности преобразования электрической энергии автономными инверторами - приведенный интегральный коэффициент гармоник напряжения (ИКГН) q -го порядка, являющийся персональной характеристикой способа ШИМ, учитывающей как качество выходной (входной) энергии, так и коммутационные потери в инверторе.

7. Получены аналитические соотношения для приведенного ИКГН 1-го порядка и аппроксимирующие соотношения для приведенных ИКГН 2-го и 3-го порядков для большинства современных способов ШИМ двух- и трехуровневых АИН. Показано, что они также справедливы для дуальных электрических величин инверторов тока.

8. Предложена методика синтеза и синтезирован ряд новых способов ШИМ по заданным критериям эффективности.

Основные положения, защищаемые автором:

1. Концепция множественности форм представления (моделей) способов управления автономными инверторами с ШИМ, позволяющих с разных сторон оценить характеристики и/или возможности способа управления.

2. Понятие «линейный модулирующий сигнал», позволяющее единообразно описать форму и энергетические характеристики всех входных и выходных переменных автономных инверторов.

3. «Принцип подобия способов», позволяющий адекватно сравнивать способы ШИМ как по входным, так и по выходным характеристикам.

4. Обобщенные аналитические соотношения для показателей качества выходного напряжения m -фазного L -уровневого автономного инвертора напряжения, справедливые для различных способов ШИМ.

5. Новый показатель оценки эффективности преобразования электрической энергии автономными инверторами - приведенный интегральный коэффициент гармоник напряжения q -го порядка как критерий объективного сравнительного анализа способов ШИМ с точки зрения дополнительных потерь в выходных и входных цепях автономного инвертора и потерь на коммутацию.

6. Синтезированные по заданным критериям эффективности способы ШИМ, защищенные патентами РФ.

Практическая ценность работы:

1. В разработке инженерной методики вывода соотношений для действующего значения и коэффициента гармоник входных и выходных переменных автономных инверторов с ШИМ.

2. В выведенных обобщенных аналитических выражениях для действующего значения и коэффициента гармоник выходного напряжения m -фазного L -

уровневого АИН, справедливых для различных способов ШИМ, и в методике, позволяющей от общих выражений переходить к частным.

3. В процедуре использования соотношений, полученных для входных и выходных параметров АИН, применительно к дуальным переменным АИТ, управляемых аналогичным способом ШИМ.

4. В полученных аналитических соотношениях для приведенного ИКГН 1-го порядка и аппроксимирующих соотношениях для приведенных ИКГН 2-го и 3-го порядков, необходимых при расчете энергетических показателей АИН прямыми методами. Показано, что они также справедливы для дуальных электрических величин инверторов тока. В аналитических соотношениях, выведенных для типовых топологий выходных цепей преобразователей, позволяющих с использованием выражений для ИКГН оценить качество электроэнергии в нагрузке.

5. В результатах сравнительного анализа синтезированных способов с существующими способами. По результатам анализа была оценена эффективность разработанных способов и область их применения.

6. В унификации процедуры реализации ШИМ в системах управления АИН и АИТ, а также в рекомендациях, алгоритмах и разработанных программах на языке Си, позволяющих реализовать синтезированные способы с использованием микропроцессорных средств.

7. В использовании совокупности теоретических и практических результатов при проектировании промышленных полупроводниковых преобразователей и в учебном процессе при подготовке магистрантов и аспирантов в области силовой электроники.

Реализация результатов работы. Основные научные положения диссертационной работы, а также результаты теоретических и экспериментальных исследований использованы при выполнении госбюджетных и хоздоговорных НИР, выполняемых в НГТУ по заказу ряда предприятий, таких как АКБ «Якорь» (г. Москва), ФГУП ПО «СЕВЕР», ЗАО «НОЭМА», ОАО «ИПФ», ТОО «СИБИРЬ-МЕХАТРОНИКА» (г. Новосибирск).

Результаты диссертационных исследований, в частности, нашли применение при разработке: электронного блока в рамках НИР «Рукоять» по созданию изделия со специфическими органами управления по тангажу и рысканию, обеспечивающими ему повышенную управляемость; эскизных проектов блока управления (КТНЦ) для электромеханического усилителя рулевого управления, мехатронной системы ПЧ-ПСПЧ, преобразователя ПЧ-ПСПЧ-L1 и преобразователя ПЧА2; полупроводниковых регуляторов температуры «ИРТ-1» мощностью 18 кВт; при разработке станций частотного управления насосными агрегатами мощностью 250-1000 кВт серии ВСЧ500-ДТС с преобразователями частоты промежуточного звена серии СЧ500.

Материалы диссертации нашли свое отражение в двух учебных пособиях ("Микропроцессорные системы управления устройствами силовой электроники", в двух частях, изданных в НГТУ соответственно в 2006 г. и в 2010 г., общим объемом 11,5 печатных листов; «Электромагнитная совместимость

устройств силовой электроники. Силовые электронные трансформаторы-2», издано в НГТУ в 2016 г. общим объемом 7,25 печатных листов) и используются в учебном процессе при подготовке студентов по специальности «Промышленная электроника» в следующих учебных курсах: «Однокристалльные микро-ЭВМ», «Микропроцессорные системы силовой электроники», а также в курсе «Электромагнитная совместимость устройств силовой электроники».

Связь темы диссертации с научно-техническими программами. Работа выполнялась в рамках следующих программ:

1. Федеральная целевая программа «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2012 годы» научно-исследовательские работы по лоту шифр «2011-16-516-015» «Проведение проблемно-ориентированных поисковых исследований в области создания эффективных накопителей электрической энергии для нужд централизованной и автономной энергетики» по теме: «Разработка и создание эффективных накопителей электрической энергии на базе многоуровневых полупроводниковых преобразователей и аккумуляторных батарей».

2. Государственный контракт от 22.10.2010 7. № 13.G36.31.0010 «Исследование, разработка и организация промышленного производства мехатронных систем для энергосберегающих технологий двойного назначения».

3. Грант РФФИ по итогам конкурса РФФИ научных проектов, выполняемых молодыми учеными под руководством кандидатов и докторов наук в научных организациях Российской Федерации в 2015 году. Проект № 15-38-50412: "Разработка и реализация гистерезисных алгоритмов управления полупроводниковыми преобразователями, работающими в системах автономного и централизованного электроснабжения" (научный руководитель). Договор № Ор 15-38-50412/15 от 22.04.2015.

4. Федеральная целевая программа «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» (Соглашение о предоставлении субсидии № 14.577.21.0198, уникальный идентификатор ПНИЭР - RFMEF157715X0198). Тема «Разработка и исследование бортовой энергопреобразующей аппаратуры с микропроцессорной системой управления и мониторинга космических аппаратов систем связи, дистанционного зондирования Земли и геодезии»

Государственный контракт №8.1327.22014К от 17.07.2014 "Силовые электронные трансформаторы".

Апробация работы. Основные материалы работы были представлены на: 3-й международной науч.-техн. конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП-96, Новосибирск, 1996; 4-й международной науч.-техн. конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП-98, Новосибирск, 1998; 7-й международной науч.-техн. конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП-2004, Новосибирск, 2004; 9-й международной науч.-техн. конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП-2008, Новосибирск, 2008; 10-й международной науч.-техн. конференции «Актуальные проблемы электронного

приборостроения» АПЭП-2010, Новосибирск, 2010; 13-й международной науч.-техн. конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП-2016, Новосибирск, 2016; 14-й науч.-техн. конференции «Электроприводы переменного тока», Екатеринбург, 2007; Международная конференция «Проблемы современной электротехники», Киев, 2008; 13-й международной науч.-техн. конференции «Силовая электроника и энергоэффективность», Алушта, 2007; 14-й международной науч.-техн. конференции «Силовая электроника и энергоэффективность», Алушта 2008; 15-й международной науч.-техн. конференции «Силовая электроника и энергоэффективность», Алушта, 2009; 18-й международной науч.-техн. конференции «Силовая электроника и энергоэффективность», Алушта, 2012; 56th *Inter-national Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTU CON)*, Riga, 2015.

Публикации. Всего по теме диссертации опубликовано 47 работ. Работ, опубликованных в ведущих рецензируемых журналах и изданиях, определённых Высшей аттестационной комиссией РФ – 16. Из 47 опубликованных работ 29 научных статей, 10 докладов на международных, межрегиональных и других научных конференциях, 6 патентов РФ и одно авторское свидетельство СССР, два учебных пособия. Шестнадцать работ и одно учебное пособие (в двух частях) написаны лично без участия соавторов. В работах [1, 2, 22, 24, 26, 29] соискателю принадлежит разработка микропроцессорного алгоритма управления и аппаратной части микропроцессорной системы управления. Выводы проведены соавторами совместно. В работах [9, 13, 14, 16, 19, 30, 36-39, 47] соискателю принадлежит общая постановка задач исследований, разработка плана компьютерного эксперимента. Анализ и верификация полученных результатов соавторами выполнено совместно. В работах [12, 17, 18, 15, 23, 20, 25, 40] соискателем проведен теоретический анализ. Выводы проведены соавторами совместно. В работах [21, 41-43] соискателем выполнена разработка схем и проведение эксперимента. Обработка результатов и выводы проведены соавторами совместно.

Структура и объем диссертации. Диссертация изложена на 248 страницах машинописного текста, содержит введение, пять глав, заключение, список литературы из 310 наименований, 140 рисунков, 46 таблиц и приложение на 45 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, изложены сведения о научной значимости, представлены основные положения, выносимые автором на защиту. Представлены сведения о практической ценности и апробации работы.

В первой главе анализируются топологии автономных инверторов напряжения и тока и эволюция методов ШИМ. Проведенное аналитическое исследование позволило выявить целый ряд моментов.

В области силовых схем автономных инверторов (АИ):

1) Широкое использование в современном производстве энергоемких технологий в условиях ограниченных энергоресурсов требует от ПП повышения уровня преобразуемой мощности и повышения эффективности преобразования электроэнергии (ЭЭ). Указанные требования привели к разработке большого числа многофазных и многоуровневых топологий ПП, прежде всего топологий широко используемых в промышленности АИН и АИТ.

2) Большое многообразие топологий АИН вызвало необходимость их систематизации и привело к разработке обобщенного варианта МУ-топологии, включающего существующие схемы и позволяющего синтезировать новые. Формирование новых схем АИТ шло по примеру АИН, причем в этом процессе широко использовался характерный для АИ принцип дуальности.

3) Анализ имеющейся информации о дуальности АИН и АИТ позволил прийти к выводу, что оба типа инверторов можно рассматривать как единый, унифицированный класс ПП с однократным преобразованием ЭЭ постоянного тока в энергию переменного тока, для которых характерны однотипные способы управления и аналитические выражения, описывающие входные и выходные переменные. Существующие же различия между двумя типами АИ можно свести к работе системы управления (СУ), по-разному реализующей один и тот же способ управления.

В области способов управления с ШИМ:

1) Наличие четырех этапов эволюции способов ШИМ, каждый из которых имеет свои особенности и причины возникновения. Причем, основной тенденцией в разработке новых способов управления АИН с ШИМ является все больший (через математическое описание) учет свойств и специфики как средств, так и объекта управления.

2) В условиях ужесточения требований к энергоэффективности ПП, в частности АИ, разработка методов синтеза и собственно синтез новых энергоэффективных способов ШИМ являются актуальными задачами.

3) Показано, что если в области силовых схем АИ обобщение выполнено, к настоящему времени - в виде разработки обобщенных МУ-топологий, то в области способов управления, также характеризующихся большим многообразием, такое обобщение отсутствует.

4) Критическое осмысление дел в области анализа и синтеза способов управления АИН привело к следующим основным выводам:

- векторная ШИМ – это одна из форм представления (моделей) способа ШИМ. Каждый способ может быть представлен разными моделями, по-своему характеризующими анализируемый способ;
- существующие методы синтеза принципиально не отличаются от тех, которые ранее были рассмотрены автором. Изменения касаются лишь стремления реализовать процедуру расчета в режиме онлайн за счет возможностей вычислительной базы, используемых математических методов, методов из области искусственного интеллекта, а также предмета синтеза - способов многоуровневой ШИМ;

- в настоящее время в области разработки и анализа способов управления с ШИМ существуют неэффективные пути, показаны причины их возникновения;
- для улучшения состояния в области разработки и анализа способов ШИМ актуальными являются систематизация и обобщение информации о способах ШИМ, разработка информационно-емких критериев и объективных условий сравнения способов, а также дальнейшее развитие теории ШИМ применительно к СЭ.

Во второй главе проведен обобщенный теоретический анализ энергетических показателей АИ, управляемых современными способами ШИМ, составляющими в настоящей работе предмет исследования. Способы представлены в скалярном виде и разделены на две группы: способы ШИМ *без* и способы ШИМ *с* введением в синусоидальный модулирующий сигнал сигнала нулевой последовательности (СНП). СНП представляет собой набор гармоник кратных числу фаз m . В зависимости от формы СНП последняя группа делится на две подгруппы: способы с непрерывным и способы с дискретным СНП.

Объектом исследования в настоящей работе являлся АИН, как наиболее исследованный и распространенный ПП. В качестве искоемых энергетических показателей, в первую очередь, выбраны: действующее значение и коэффициент гармоник его входных и выходных переменных.

Вывод соотношений для действующего значения исследуемого импульсного сигнала основан на допущении о высокой кратности K_p (отношении) частот опорного и модулирующего сигналов. Из чего вытекает следующее: коэффициент заполнения импульсов, модулируемых по длительности на периоде всей кривой, можно усреднить на такте повторения и заменить непрерывной функцией. Таким образом, исследуемая импульсная кривая будет представлена только непрерывными функциями, описывающими изменение амплитуды и длительности импульсов, что позволяет прямо использовать процедуру интегрирования, необходимую для вывода выражения для действующего значения. Зная соотношения для действующего значения функции и ее полезной составляющей (первой или нулевой гармоники), можно определить коэффициент гармоник исследуемой функции и действующее значение ее высокочастотных компонентов. Предложенная методика анализа имеет универсальный характер. Она справедлива для входных и выходных электрических переменных двухуровневых и многоуровневых АИН.

Визуальный анализ временных диаграмм входных и выходных переменных АИ позволяет сделать следующий вывод: в общем случае исследуемый сигнал состоит из компонентов, разделенных нулевыми паузами; каждый компонент в общем случае состоит из нескольких прилегающих друг к другу импульсов разной амплитуды и длительности; число импульсов в компоненте, зависит от типа переменной и топологии схемы; на периоде исследуемой кривой существует несколько подинтервалов, на каждом из которых амплитуды и длительности импульсов в компонентах, описываются по своим определенным за-

конам. В соответствии с вышесказанным функцию исследуемой переменной на k -ом подинтервале можно записать:

$$f_k(t) = \sum_{p=1}^P f_{kp}(t) = \sum_{p=1}^P \sum_{n=1}^N A_{kpn}(t) \quad (1)$$

где P - число тактовых интервалов на k -ом подинтервале; N - число импульсов, входящих в каждый компонент кривой на k -ом подинтервале; A_{pnk} - амплитуда n -го импульса p -го тактового интервала k -го подинтервала.

Выполнив усреднение и возведя выражение в квадрат, что необходимо при вычислении действующего значения, получим искомое выражение для квадрата анализируемой переменной:

$$F^2 = \frac{1}{T} \sum_k \int_{t_k}^{t_{k+1}} \left[\sum_{n=1}^N A_{nk}^2(t) \gamma_{nk}(t) \right] dt \quad (2)$$

где $A_{nk}(t)$ и $\gamma_{nk}(t)$ - непрерывные функции, описывающие соответственно амплитуду и коэффициент заполнения n -х импульсов на k -м подинтервале; K - число подинтервалов в анализируемой кривой на периоде повторения T ; t_k , t_{k+1} - начальная и конечная временные границы k -го подинтервала.

Определим в общем виде закон изменения коэффициента заполнения γ_{nk} . Положения переднего и заднего фронтов импульсов на каждом подинтервале определяются коммутациями в разных, но одних и тех же двух фазах АИН. Процессы в каждой фазе можно выразить коммутационной функцией, которая описывается соответствующим коэффициентом заполнения, выражение для которого известно и имеет вид:

$$\gamma_i = 0.5 + 0.5e_{mi} \quad (3)$$

где e_{mi} - фазный модулирующий сигнал i -й фазы ($i=A, B, C$). Тогда γ_{nk} импульсов в исследуемой кривой можно представить как разность коэффициентов заполнения двух фаз, формирующих эти импульсы на соответствующем k -м подинтервале:

$$\gamma_{nk} = \gamma_{i,(i+1)} = \gamma_i - \gamma_{i+1} = (0.5 - e_{mi}/2) - [0.5 + e_{m(i+1)}/2] = e_{mi,(i+1)}/2 \quad (4)$$

где e_{mi} и $e_{m(i+1)}$ - соответственно фазные модулирующие сигналы i -й и $(i+1)$ -й фаз, формирующие фронты n -х импульсов на k -м подинтервале (индексы « n » и « k » в выражении (5) опущены).

Таким образом, коэффициент заполнения всех импульсов исследуемых кривых выражается через полуразность формирующих их модулирующих сигналов, которую предлагается назвать **линейным модулирующим сигналом**. На каждом k -м подинтервале длительности импульсов компонента будут модулировать свои линейные модулирующие сигналы. Т.к. полуразность фазных модулирующих сигналов в способах с добавлением СНП представляет собой синусоиду, то все рассматриваемые способы ШИМ по влиянию на длительно-

сти импульсов входных и выходных переменных АИН, в частности импульсов линейного напряжения, являются синусоидальными.

По предложенной методике были проанализированы входные и выходные характеристики m -фазного двухуровневого АИН (2У-АИН) для рассматриваемых способов. В таблице 1 приведены выведенные соотношения для компонентов линейного напряжения в относительных единицах (индекс звездочка, базовая величина - напряжение источника питания E_d) и коэффициента гармоник.

Таблица 1 – Характеристики линейного напряжения 2У-АИН

Параметр	$m=2$	$m=3$		$m=5$	
	СШИМ	СШИМ	СШИМ+3*	СШИМ	СШИМ+5*
$\sin(\pi/m)$	1.0	$\sqrt{3}/2$		0.588	
K_m	1.0	1.0	$2/\sqrt{3}$	1.0	1.0515
ΔM	0÷1.0	0÷1.0	$0 \div 2/\sqrt{3}$	0÷1.0	0÷1.0515
ΔM^*	0÷1.0	$\sqrt{3}/2$	0÷1.0	0.588	0.618
U_{1m}^*	M	$\sqrt{3}M/2$		0.588M	
U_1^*	$M/\sqrt{2}$	$\sqrt{3}M/2\sqrt{2}$		$0.588M/\sqrt{2}$	
U_h^*	$\sqrt{M\left(\frac{2}{\pi} - \frac{M}{2}\right)}$	$\sqrt{M\left(\frac{\sqrt{3}}{\pi} - \frac{3M}{8}\right)}$		$\sqrt{M\left(\frac{1.176}{\pi} - 0.173M\right)}$	
U^*	$\sqrt{2M/\pi}$	$\sqrt{\sqrt{3}M/\pi}$		$\sqrt{\frac{1.176M}{\pi}}$	
K_Γ	$\sqrt{\frac{4}{\pi M}} - 1$	$\sqrt{\frac{8}{\pi\sqrt{3}M}} - 1$		$\sqrt{\frac{4}{0.588\pi M}} - 1$	

Переменные в таблице: M – глубина модуляции (отношение амплитуд модулирующего и опорного сигналов); U_h^* – действующее значение амплитуд высших гармоники линейного напряжения.

Анализ показал, что в рамках одной топологии (для одного числа фаз) выражения для параметров линейного напряжения идентичны для всех способов ШИМ, включая способы с добавлением СНП (колонки с общим обозначением «СШИМ+ m^* »). Отличие последних заключается в расширении (по сравнению с $M=1.0$) линейного диапазона регулирования 1-й гармоники, которое выражается известным коэффициентом расширения глубины модуляции K_m :

$$K_m = \frac{1}{\cos(\pi/2m)} \quad (5)$$

Отметим, что случай $m=2$, соответствует однофазному мостовому АИН, который в данной работе называется двухфазным АИН, т.к. по всем формальным признакам он подходит под общее понятие « m -фазный АИН».

Анализ соотношений показал, что все наборы полученных для каждого значения m формул можно свести к одному, более простому и общему для всех способов и топологий набору, соответствующему базовой топологии АИН, в

качестве которой выбран двухфазный АИН с СШИМ (затемненная колонка $m=2$). Такое обобщение характеризуется тем, что все исследованные варианты приведены к одной и той же величине 1-й гармоники линейного напряжения. Поэтому в этом случае в формулах используется **обобщенная глубина модуляции** - отношение амплитуды первой гармоники выходного напряжения m -фазного 2У-АИН к напряжению источника питания (M^*). При этом другие способы и топологии отличаются от базового варианта только линейным диапазоном регулирования первой гармоники ΔM^* (см. затемненную строку в таблице 1). В общем случае данный диапазон определяется соотношением:

$$\Delta M^* = K_m \sin(\pi/m) \quad (6)$$

Вышесказанное иллюстрируется рисунком 1. На нем совмещены обобщенные графики коэффициента гармоник и 1-й гармоники линейного напряжения 2У-АИН для $m=2, 3, 5$. На рисунке вертикальными линиями обозначены верхние границы линейного диапазона: штрих-пунктирные – способы ШИМ, пунктирные - способы СШИМ+ m^* . Регулировочные характеристики АИН в соответствующих областях перемодуляции обозначены пунктирными линиями.

Полученные результаты позволили вывести **принцип подобия способов ШИМ (ППС)**: *при одной и той же величине 1-й гармоники линейного напряжения 2У-АИН выражения для его действующего значения и коэффициента гармоник одинаковы для всех топологий и синусоидальных способов ШИМ. Отличия между способами и топологиями заключаются только в величине линейного диапазона регулирования 1-й гармоники напряжения.*

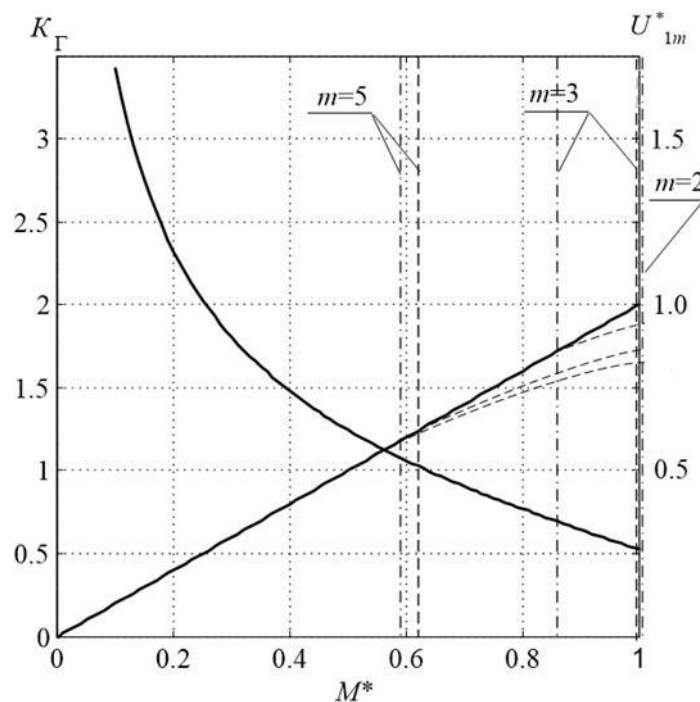


Рисунок 1 - Обобщенные характеристики линейного напряжения 2У-АИН

ППС также вводит дополнительное условие адекватного сравнения способов ШИМ: они должны сравниваться при одном и том же уровне 1-й гармоники выходного напряжения.

Результаты анализа фазного напряжения m -фазного 2У-АИН и входного тока трехфазного 2У-АИН аналогичны тем, которые были получены для линейного напряжения m -фазного 2У-АИН. Отличие заключалось только в том, что ППС в этих случаях оказывался справедливым только в рамках одной топологии.

Завершающим этапом обобщенного анализа стал вывод соотношений для действующего значения и коэффициента гармоник линейного напряжения многоуровневых АИН. Как показал компьютерный эксперимент, в этом случае ППС справедлив для всех рассмотренных вариантов, что позволило получить один набор формул справедливых в общем случае для m -фазного L -уровневого АИН. Данные формулы приведены в таблице 2 и отображены графически на рисунке 2. Базовым вариантом также является двухфазный L -уровневый АИН.

В выражениях из таблицы 2 используются переменные: $K=0...(L-2)$ – номер поддиапазона глубины модуляции, соответствующий одинаковой форме линейного напряжения; $i=1...K$ – количество слагаемых в конечных рядах под знаком корня, равное числу точек переходов между уровнями напряжений (подразумевается, что при $K=0$ число членов рядов равно нулю, и что число уровней $L \geq 2$). Для каждого поддиапазона глубины модуляции K имеют место своя форма линейного напряжения (число уровней) и свои выражения для ряда выходных параметров, что в таблице 2 отражено одноименным индексом « K ».

Таблица 2 – Обобщенные выходные характеристики m -фазного МУ-АИН

Параметр	$m=2$	$m=3$		$m=5$		$m=7$	
	СШИМ	СШИМ	СШИМ+3*	СШИМ	СШИМ+5*	СШИМ	СШИМ+7*
$\sin\left(\frac{\pi}{m}\right)$	1.0	0.866		0.588		0.434	
K_m			1.15		1.0515		1.026
ΔM^*	$0 \div 1.0$	$0 \div 0.866$	$0 \div 1.0$	$0 \div 0.588$	$0 \div 0.618$	$0 \div 0.434$	$0 \div 0.445$
U_{1m}^*	M^*						
U_K^*	$\sqrt{\frac{2M^*}{\pi(L-1)} \left(1 + 2 \sum_{i=1}^K \sin \vartheta_i\right) - \frac{4}{\pi(L-1)^2} \sum_{i=1}^K i \vartheta_i}$						
K_{Γ_K}	$\sqrt{\frac{4}{\pi(L-1)M^*} \left(1 + 2 \sum_{i=1}^K \sin \vartheta_i\right) - \frac{8}{\pi(L-1)^2 M^{*2}} \sum_{i=1}^K i \vartheta_i - 1}$						
M_i^*	$\arccos\{i / [(L-1)M^*]\}$						
ϑ_i	$i / (L-1)$						
m_i	$m_i < \pi / \arcsin[i / (L-1)]$						

В таблице 2 также приведены параметры, описывающие i -е точки перехода с одного уровня на другой: ϑ_i – момент перехода с $(i+1)$ -го уровня на $(i+2)$ -й уровень; m_i – число фаз, меньше которого возможно появление $(i+2)$ -го уровня;

M_i - величина глубины модуляции, начиная с которой в кривой линейного напряжения появляется $(i+2)$ -й уровень (при выполнении выражения для m_i).

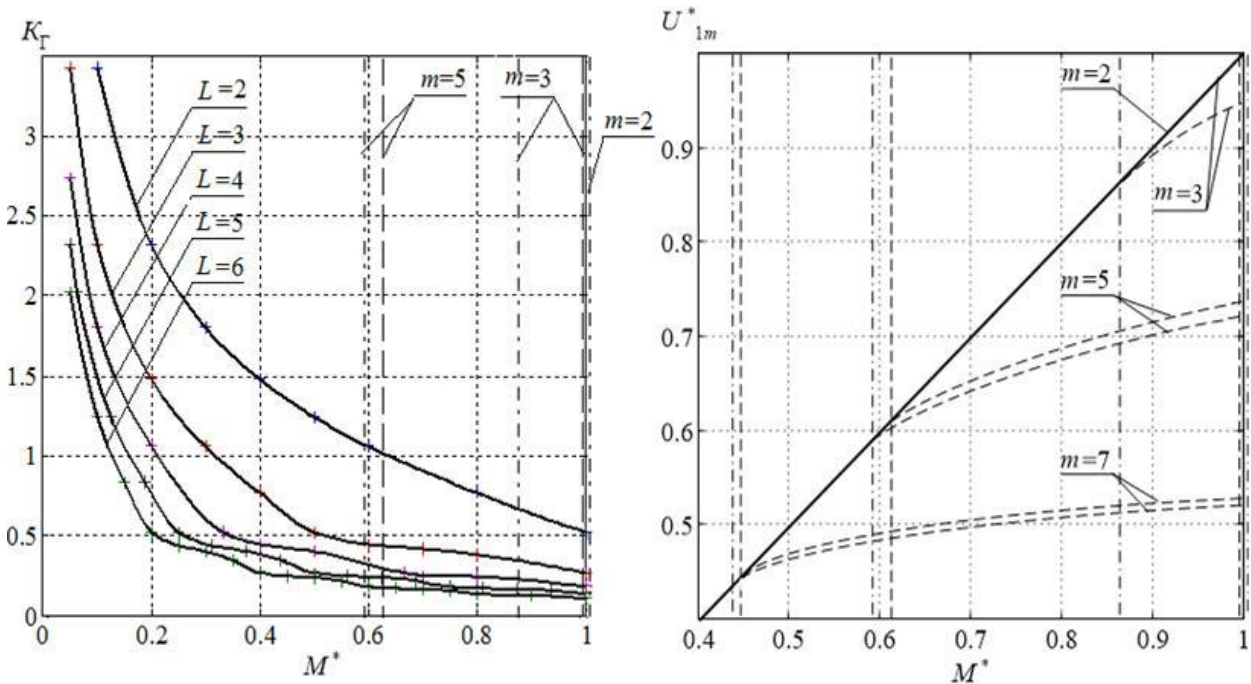


Рисунок 2 - Графики обобщенных характеристик линейного напряжения m -фазного МУ-АИН

Важным выводом проведенного анализа является следующее: действующее значение и коэффициент гармоник входных и выходных переменных АИН не могут служить (при адекватных условиях) критериями сравнения способов ШИМ. Они, скорее, являются энергетическими показателями общности способов. Коэффициент гармоник, в частности говорит, что «вес» высокочастотных компонентов по отношению к 1-й гармонике для всех способов одинаков. Таким образом, для сравнения способов ШИМ, для оценки их отличительных характеристик нужны другие энергетические показатели, в частности те, которые говорят не только о «весе» высокочастотных гармоник, но и об их расположении в спектре, к полезному компоненту. Это мотивировано тем, что для большинства случаев применения АИН основную негативную роль (с точки зрения потерь и массогабаритных показателей) в системе в целом играют ближайшие к 1-й (или нулевой для входного тока АИН) гармонике компоненты спектра.

В этом плане целесообразнее использовать «взвешенный» коэффициент гармоник, в котором амплитуда каждой гармоники делится на свой номер. Указанный коэффициент является одним из компонентов системы показателей некачественности ЭЭ прямых методов расчета ПП: системы интегральных коэффициентов гармоник напряжения (ИКГН) q -го порядка, в общем виде определяемых как:

$$K_{\Gamma}^{(q)} = \frac{1}{U_1} \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} \left(\frac{U_k}{k^q} \right)^2} \quad (7)$$

где U_1 , U_k – соответственно действующее (или амплитудное) значение 1-й и k -й гармоники; q – порядок ИКГН (любое положительное целое или дробное число). Эти коэффициенты содержательно показывают качество напряжения после прохождения через идеальные интегрирующие фильтры q -го порядка. С другой стороны, если RL -нагрузку, например, асинхронный двигатель, в первом приближении для высших гармоник считать чисто индуктивной нагрузкой, то коэффициент гармоник тока будет равен ИКГН 1-го порядка.

В соответствии с вышесказанным, ИКГН 1-го порядка ($q=1$) предлагается использовать как критерий энергоэффективности для сравнительного анализа способов управления и для синтеза способов ШИМ. При этом под энергооптимальностью будем понимать минимизацию дополнительных активных потерь в нагрузке, обусловленных высокочастотными составляющими спектра напряжения. Можно показать, что при допущении о чисто индуктивной нагрузке для высших гармоник, эти потери выражаются формулой:

$$\Delta P_h = (K_{\Gamma}^{(1)} I)^2 R \quad (8)$$

где I и R – соответственно действующее значение тока и активное сопротивление нагрузки. Другими словами, минимизируя ИКГН 1-го порядка, мы минимизируем дополнительные потери в нагрузке, причем в квадратичной зависимости. Однако данный показатель имеет недостаток, он обратно пропорционален кратности частот опорного и модулирующего сигналов. Было показано, что при больших кратностях и структуре спектра напряжения, характерной для синусоидальных способов ШИМ (1-я гармоник и бесконечный набор комбинационных групп гармоник, формирующихся вокруг гармоник пропорциональных кратности), ИКГН-1 можно выразить так:

$$K_{\Gamma}^{(1)} = \frac{1}{U_1} \sqrt{\sum_{p=1}^{\infty} \left(\frac{U_p}{K_p p} \right)^2} \quad (9)$$

где U_p – эквивалентное действующее значение гармоник p -й комбинационной группы спектра. Откуда можно получить:

$$K_{\Gamma}^{(1)} K_p = \frac{1}{U_1} \sqrt{\sum_{p=1}^{\infty} \left(\frac{U_p}{p} \right)^2} \quad (10)$$

Таким образом, произведение ИКГН-1 на K_p от величины кратности уже не зависит и определяется только амплитудами гармоник спектра, поделенными (в несколько ином виде) на свой номер. Для каждого метода ШИМ распределение гармоник в спектре, как правило, индивидуально, поэтому данное выражение суть персональная характеристика способа, учитывающая как вес высших гармоник, так и степень их приближения к 1-й гармонике. Следовательно, она может быть показателем, позволяющим адекватно сравнить между собой способы ШИМ с точки зрения энергоэффективности управляемого АИН. Так как выражение (10) получено в общем виде, то оно справедливо для любых

способов ШИМ и топологий АИН, обеспечивающих указанную выше структуру спектра напряжения.

С практической точки зрения более важным параметром является не кратность частот, а число коммутаций, напрямую определяющее коммутационные потери в АИН. Кроме того, в ряде способов управления процедура формирования выходного напряжения довольно сложная и характеризуется наличием коммутаций, не связанных с опорным и модулирующим сигналами, или отсутствием вообще коммутаций на некоторых интервалах периода выходной частоты. Поэтому для сравнительного анализа способов управления предлагается использовать *приведенный* ИКГН 1-го порядка, определяемый как

$$K_{\Gamma_{\text{пр}}}^{(1)} = K_{\Gamma}^{(1)} K_{\text{кф}} \quad (11)$$

где $K_{\text{кф}}$ – число коммутаций в фазе АИН на периоде выходной частоты.

Предложено в качестве **критериев эффективности энергетических процессов АИН использовать**: для синтеза закона модуляции – ИКГН 1-го порядка, для сравнительного анализа способов управления как обыкновенный, так и приведенный ИКГН 1-го порядка. Причем дополнительным условием сравнения является, в соответствии с ППС, одинаковый уровень первой гармоники выходного напряжения инвертора.

Поскольку детальное сравнение подразумевает комплексную оценку способа управления, то аналогично выходному напряжению указанные выше коэффициенты можно использовать и для входного тока АИН. При этом формулы (7) и (11) для интегрального коэффициента гармоник входного тока (ИКГТ) 1-го порядка принимают следующий вид:

$$K_{\Gamma\text{T}}^{(q)} = \frac{1}{I_d} \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} \left(\frac{I_{dk}}{k^q} \right)^2}, \quad K_{\Gamma\text{T}_{\text{пр}}}^{(1)} = K_{\Gamma\text{T}}^{(1)} K_{\text{кф}} \quad (12)$$

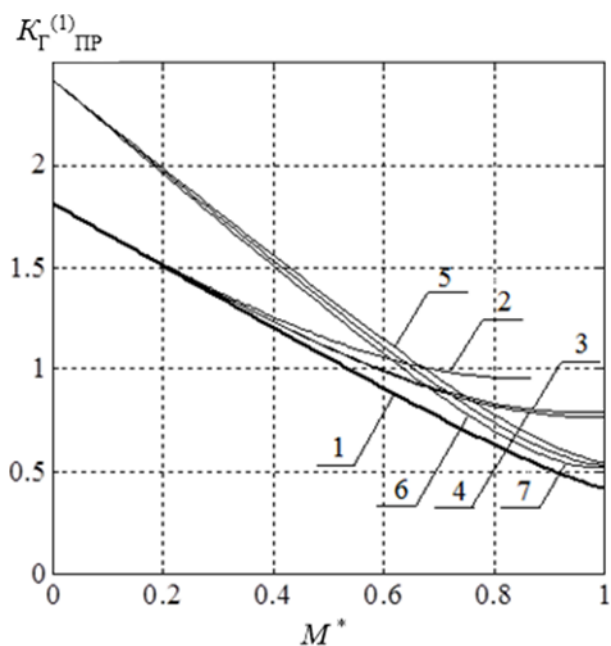
где I_d и I_{dk} – соответственно постоянная составляющая и действующее значение k -й гармоники входного тока. Однако проведенный автором анализ входных и выходных характеристик показал, что соотношение между способами ШИМ по данным интегральным коэффициентам качественно не отличается. Таким образом, чтобы распределить способы по ранжиру с точки зрения энергоэффективности, достаточно их оценить только по качеству выходной энергии, что упрощает процесс сравнения.

Для современных способов ШИМ были выведены аналитические выражения для приведенного ИКГН 1-го порядка двух (2ф) и трехфазных 2У-АИН, которые приведены в таблице 3 и отображены на рисунке 3. В таблице используются следующие обозначения способов управления: СШИМ – синусоидальная, СШИМ+3 – синусоидальная с 3-й гармоникой, СШИМ+Δ – синусоидальная с треугольником (аналоговый вариант векторной ШИМ с 6-ю коммутациями на периоде усреднения), ДШИМ0 ÷ ДШИМ3 – синусоидальные с соответствующим дискретным СНП (аналоговые варианты векторной ШИМ с 4-мя коммутациями на периоде усреднения). На рисунке 3 *a* номера кривых соответствуют:

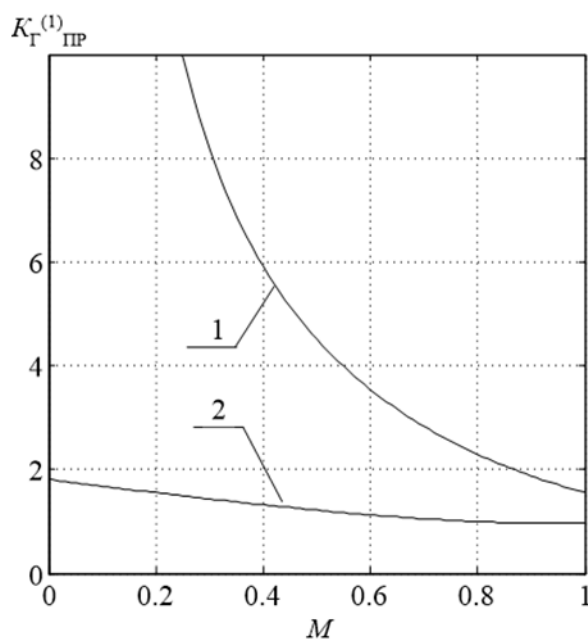
1 – СШИМ (2ф-АИН), 2 – СШИМ, 3 – СШИМ+3, 4 – СШИМ+Δ, 5 – ДШИМ-1, 6 – ДШИМ-0/2, 7 – ДШИМ-3. Из графиков видно, что для $M < 0.7$ наиболее эффективным является способ СШИМ+Δ, а для $M > 0.7$ ДШИМ-3.

Таблица 3 – Приведенный ИКГН 1-го порядка в зависимости от M^*

Способ ШИМ	ΔM^*	$M=1$	$K_{ГПР}^{(1)}$
СШИМ (2ф-АИН)	$0 \div 1.0$	0.4150	$\frac{\sqrt{2}\pi}{3} \sqrt{\frac{3}{2} - \frac{8}{\pi} M^* + \frac{9}{8} M^{*2}}$
СШИМ	$0 \div \sqrt{3}/2$	0.9600	$\frac{\sqrt{2}\pi}{3} \sqrt{\frac{3}{2} - \frac{8}{\pi} M^* + \frac{3}{2} M^{*2}}$
СШИМ+3	$0 \div 1.0$	0.8040	$\frac{\sqrt{2}\pi}{3} \sqrt{\frac{3}{2} - \frac{8}{\pi} M^* + \frac{4}{3} M^{*2}}$
СШИМ+Δ	$0 \div 1.0$	0.7898	$\frac{\sqrt{2}\pi}{3} \sqrt{\frac{3}{2} - \frac{8}{\pi} M^* + \frac{9}{4} \left(1 - \frac{3\sqrt{3}}{4\pi}\right) M^{*2}}$
ДШИМ0, ДШИМ2...	$0 \div 1.0$	0.6433	$\frac{2\sqrt{2}\pi}{9} \sqrt{6 - \frac{35}{\pi} M^* + \frac{9}{2} \left(1 + \frac{3\sqrt{3}}{8\pi}\right) M^{*2}}$
ДШИМ1	$0 \div 1.0$	0.6789	$\frac{2\sqrt{2}\pi}{9} \sqrt{6 - \left(\frac{45}{\sqrt{3}\pi} + \frac{8}{\pi}\right) M^* + \frac{9}{2} \left(1 + \frac{\sqrt{3}}{4\pi}\right) M^{*2}}$
ДШИМ3	$0 \div 1.0$	0.6056	$\frac{2\sqrt{2}\pi}{9} \sqrt{6 + \left(\frac{45}{\sqrt{3}\pi} - \frac{62}{\pi}\right) M^* + \frac{9}{2} \left(1 + \frac{\sqrt{3}}{2\pi}\right) M^{*2}}$
СШИМ (нагрузка с N)	$\Delta M = 0 \div 1.0$	∞	$\pi \sqrt{\frac{2}{3M^2} + \frac{M^2}{4} - \frac{2}{3}}$



а)



б)

Рисунок 3 - Графики приведенных ИКГН 1-го порядка

В последней строке таблицы 3 приведено соответствующее выражение для АИН с СШИМ и нагрузкой с нулевым проводом, часто используемых в системах электроснабжения. Графики данного ИКГН и (для сопоставления) ИКГН трехфазного АИН без нулевого провода приведены на рисунке 3 б.

Для ИКГН 2-го и 3-го порядков вывод соотношений представляет сложную задачу, и аналитические зависимости для них были получены численно, с использованием известных выражений для спектров напряжения АИН и возможностей программы Excel аппроксимировать кривые по точкам. Результаты приведены в таблицах 4 и 5. В выражениях « x » это глубина модуляции M .

Таблица 4 – Приведенные ИКГН для двухуровневых АИН

	$K_{\Gamma_{\text{ПР}}}^{(2)}$	$K_{\Gamma_{\text{ПР}}}^{(3)}$
СШИМ (2ф-АИН)	$1.28x^3 - 2.31x^2 - 0.04x + 1.47$	$1.36x^3 - 2.52x^2 + 0.13x + 1.42$
СШИМ	$0.65x^2 - 0.31x + 1.49$	$-2.30x^3 + 4.11x^2 + 0.40x + 1.40$
СШИМ+3	$0.34x^3 - 0.05x^2 - 0.34x + 1.49$	$-1.14x^3 + 2.54x^2 + 0.002x + 1.42$
СШИМ+Δ	$0.39x^3 - 0.15x^2 - 0.33x + 1.49$	$-1.06x^3 + 2.41x^2 - 0.04x + 1.43$

Таблица 5 – Приведенные ИКГН для трехуровневых АИН

Параметр	СШИМ (2ф-АИН)	СШИМ (3ф-АИН)
$K_{\Gamma_{\text{ПР}}}^{(1)}$	1: $6.23x^3 - 3.95x^2 - 2.27x + 1.77$ 2: $-0.97x^2 + 1.22x - 0.03$	$1.60x^3 - 0.22x^2 - 3.16x + 2.28$
$K_{\Gamma_{\text{ПР}}}^{(2)}$	1: $10.96x^3 - 9.78x^2 + 0.02x + 1.47$ 2: $-1.02x^2 + 1.31x - 0.08$	$6.22x^3 - 7.88x^2 - 0.37x + 2.90$
$K_{\Gamma_{\text{ПР}}}^{(3)}$	1: $11.73x^3 - 10.76x^2 + 0.43x + 1.41$ 2: $-1.02x^2 + 1.32x - 0.09$	$13.17x^3 - 18.17x^2 + 1.65x + 5.03$

Необходимость знания ИКГН была показана на примере анализа прямыми методами расчета коэффициента гармоник тока $K_{\Gamma_{\text{T}_H}}$ и напряжения $K_{\Gamma_{\text{H}_H}}$ в нагрузке для типовых топологий выходных цепей АИН, которые приведены на рисунке 4, а результаты анализа - в таблице 6.

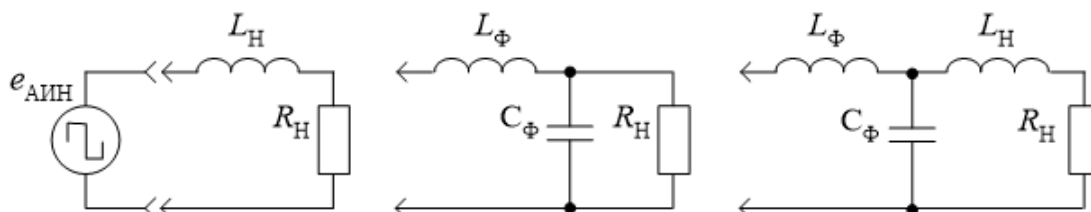


Рисунок 4 - Типовые топологии на выходе АИН

Из полученных формул видно, что в них всегда присутствует ИКГН соответствующего порядка. Аналогичный анализ показателей качества энергии нагрузки был выполнен и для АИТ с типовыми топологиями выходных цепей. При этом имелось в виду, что выражения для ИКГН справедливы и для выходного тока АИТ с аналогичными топологией и способом ШИМ.

В заключение исследования была показана процедура использования соотношений, выведенных для входных и выходных переменных трехфазного 2У-АИН, применительно к дуальным переменным трехфазного 2У-АИТ. Формулы

приведены (для электрических величин в относительных единицах) в соответствующих колонках таблицы 7. В колонках «Параметр АИН (АИТ)» рядом с параметром АИН в скобках указан параметр дуальной величины АИТ. Выражения для параметров дуальных переменных идентичны, отличия заключаются только в базовых величинах, выражения для которых приведены в нижней строке таблицы 7. Таким образом, основная сложность упомянутого «переноса» заключается в правильном выборе базовой величины. В то же время коэффициенты гармоник дуальных переменных полностью идентичны.

Таблица 6 – Показатели качества энергии в нагрузке АИН по схемам рисунка 4

Пара- ра- метр	На- грузка	Схема а)	Схема б)	Схема в)
$K_{ГТ_Н}$	$R_H \approx \omega L_H$	$K_{Г}^{(1)} \sqrt{(1/\omega\tau_H)^2 + 1}$	$a^2 K_{Г}^{(2)} \sqrt{(\omega\tau_\Phi)^2 + 1}$	$a^2 K_{Г}^{(3)} \sqrt{(L_\Phi^* + 1)^2 + (1/\omega\tau_H)^2}$
	$R_H \ll \omega L_H$	$K_{Г}^{(1)}$	$a^2 K_{Г}^{(2)}$	$a^2 K_{Г}^{(3)} (L_\Phi^* + 1)$
$K_{ГН_Н}$	$R_H \approx \omega L_H$	$K_{ГН_АИН}$	$a^2 K_{Г}^{(2)} \sqrt{(\omega\tau_\Phi)^2 + 1}$	$a^2 K_{Г}^{(3)} \frac{\sqrt{(L_\Phi^* + 1)^2 (\omega\tau_H)^2 + 1}}{\sqrt{(\omega\tau_H)^2 + 1}}$
	$R_H \ll \omega L_H$	$K_{ГН_АИН}$	$a^2 K_{Г}^{(2)}$	$a^2 K_{Г}^{(3)} (L_\Phi^* + 1)$
$a = \omega_\Phi / \omega, \quad \omega_\Phi = 1/\sqrt{L_\Phi C_\Phi}, \quad \tau_H = L_H / R_H, \quad \tau_\Phi = L_\Phi / R_H, \quad L_\Phi^* = L_\Phi / L_H$				

Таблица 7 – Формулы для дуальных величин трехфазных АИ

Выходные характеристики АИ			Входные характеристики АИ		
Параметр АИН (АИТ)	Тип ШИМ		Параметр АИН (АИТ)	Тип ШИМ	
	СШИМ	СШИМ+3*		СШИМ	СШИМ+3*
ΔM	$0 \div 0.866$	$0 \div 1.0$	ΔM	$0 \div 0.866$	$0 \div 1.0$
$U^*(I^*)$	$\sqrt{2M/\pi}$		$ID^*(ED^*)$	$\sqrt{\frac{M^3}{\pi}(1+4\cos^2\varphi)}$	
$U_1^*(I_1^*)$	$M/\sqrt{2}$		$I_d^*(E_d^*)$	$\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}}M^2\cos\varphi$	
$U_B^*(I_B^*)$	$\sqrt{\frac{2M}{\pi}-\frac{M^2}{2}}$		$ID_h^*(ED_h^*)$	$\sqrt{M^3\left[\frac{1}{\pi}+\left(\frac{4}{\pi}-\frac{3}{2}M\right)\cos^2\varphi\right]}$	
K_{Γ_OUT}	$\sqrt{\frac{4}{\pi M}}-1$		K_{Γ_IN}	$\sqrt{\frac{2(5+tg^2\varphi)}{3\pi M}}-1$	
$U_B=E_d\ (I_B=I_d)$			$I_B=\frac{E_d}{\sqrt{6}\cdot z_H}\left(U_B=\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}}I_dz_H\right)$		

В третьей главе по заданным критериям выполнен синтез энергооптимальных способов ШИМ с использованием формального и эвристического (неформального) методов. Суть формального метода сводится к следующему: определение по тем или иным заданным энергетическим характеристикам АИН импульсов управления его вентилями. Несмотря на актуальность синтеза энергооптимальных СПУ, данный вопрос до настоящего времени окончательно еще не решен. Это объясняется тем, что практически реализовать ту или иную процедуру синтеза способа управления АИН с ШИМ довольно трудно, описать ее в замкнутом виде практически невозможно.

Автором видится решение проблемы синтеза, в частности, в декомпозиции задачи. С этой целью было предложено способ программного управления (СПУ) разделить на три компонента: закон модуляции (ЗМ), алгоритм переключения (АП) и процедуру реализации способа (ПРС), а задачу его синтеза – на три соответствующие подзадачи синтеза. В соответствии с этим были сформулированы определения для всех компонентов СПУ и трактовка процесса его синтеза: ЗМ – это величина и изменение длительностей импульсов его линейного напряжения на периоде выходной частоты АИН; АП – это очередность и число коммутаций на периоде выходной частоты АИН; ПРС – это совокупность сигналов и алгоритмов, необходимых для реализации способа управления; синтез энергооптимального способа управления – это определение по форме выходного напряжения, синтезированной по заданному критерию энергооптимизации, параметров модулирующих и опорных сигналов, а также импульсов управления вентилями АИН. Синтез алгоритма переключения широко освещен в литературе и в данной главе не рассматривался.

Была предложена методика синтеза ЗМ по минимуму ИКГН 1-го порядка и заданных ограничениях, упрощающих процедуру синтеза (симметрия 4-го рода, постоянство действующего значения исходной кривой напряжения), основанная на варьировании положения импульсов исходной кривой напряжения на одной четверти периода модуляции или тактовом интервале. Особенностью предложенной методики синтеза является то, что она заканчивается синтезом ПРС, т.е. синтезом, в первую очередь, модулирующего и опорного сигналов, позволяющих реализовать синтезированный СПУ вертикальными методами, что улучшает его динамические свойства и расширяет область применения. Использование методики позволило синтезировать оптимальные законы модуляции для двухфазного (СШИМ_{C1}) и трехфазного (СШИМ_{C2}) мостового АИН.

В обоих случаях расчетным путем были получены зависимости с явным минимумом, позволившие определить оптимальное положение импульсов линейного напряжения. Так, на рисунке 5 представлены кривые зависимостей ИКГН 1-го порядка от положения импульсов для разных глубин модуляции для трехфазного АИН при кратности $K_p = 9$. Выбранный тип симметрии и особенность формирования напряжения данного инвертора привели к уменьшению числа варьируемых параметров (импульсов) до одного, положение которого (dv) в пределах тактового интервала и откладывалось на оси абсцисс приведен-

ных графиков. Синтез способа СШИМ_{C2} для $K_p = 15$ несколько усложнил задачу, т.к. массив варьируемых параметров стал двумерным. Синтез СШИМ_{C1} для двухфазного АИН, в силу независимости импульсов его напряжения друг от друга, проводился варьированием положения импульсов на четверти периода модулирующего сигнала.

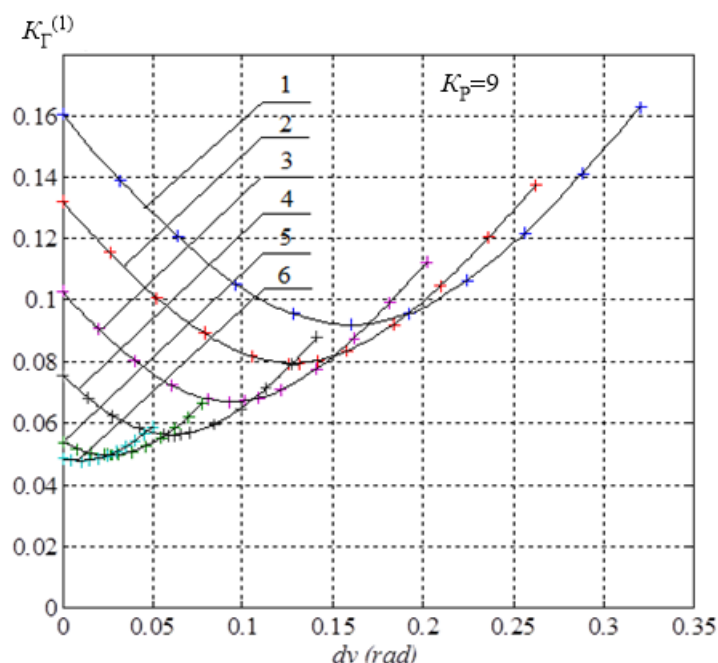


Рисунок 5 - Синтез 3М линейного напряжения трехфазного АИН при $K_p = 9$

Разработана методика перехода от формы ШМ-импульсов, полученных из импульсов синтезированной кривой напряжения на основе выведенных соотношений связи между их фронтами, к форме опорного (модулирующего) сигнала при заданной форме модулирующего (опорного) сигнала – синтез ПРС. Методика основана на решении уравнения фазовой модуляции и линейризации полученных результатов. На рисунке 6 и рисунке 7 приведены формы синтезированных сигналов управления соответственно для двухфазного (СШИМ_{C1}) и трехфазного (СШИМ_{C2}) АИН.

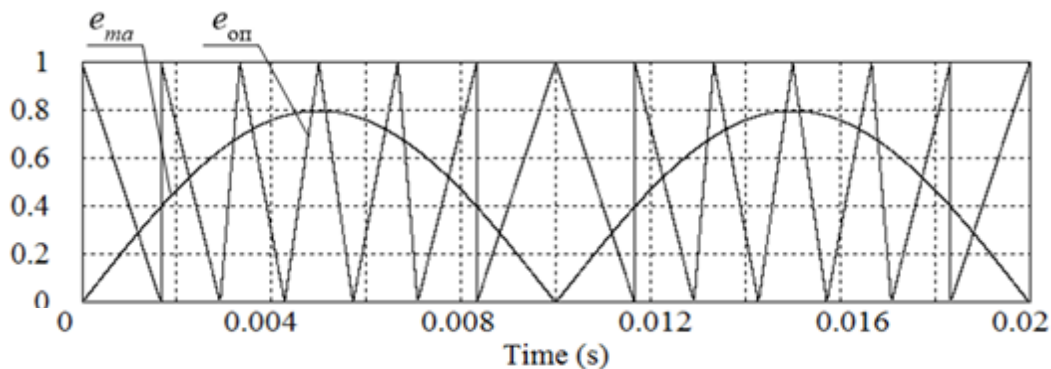


Рисунок 6 - Синтезированный способ СШИМ_{C1}: $K_p = 12$, $M = 0.8$

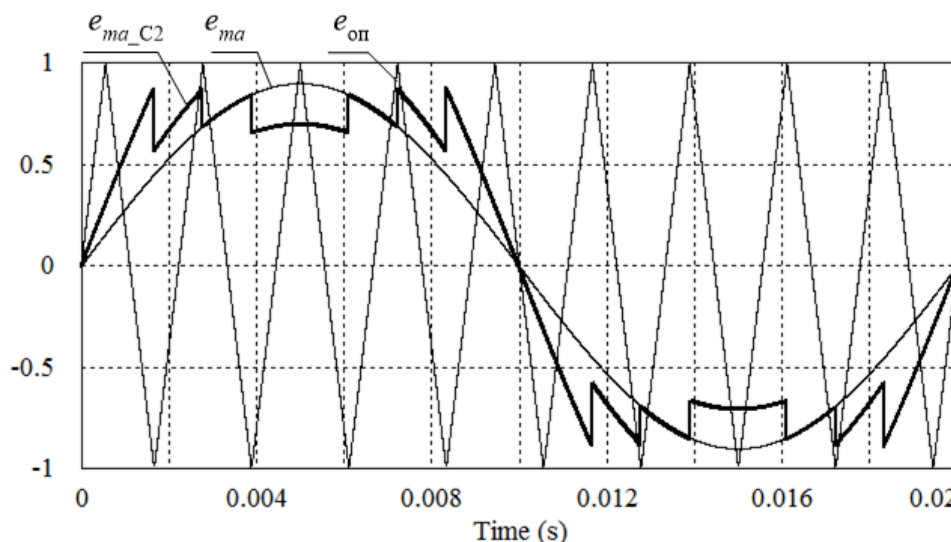


Рисунок 7 - Синтезированный способ СШИМ_{C2}: $K_p=9$, $M=0.9$

Особенностью способа СШИМ_{C1} является модуляция длительностей основания наклонных участков опорного сигнала при неизменном его периоде. На первой четверти периода модулирующего сигнала относительная длительность оснований нарастающего и спадающего участков опорного сигнала описываются соответственно следующими уравнениями:

$$\tau_H^{i*} = \sin(i2\pi / K_p), \quad \tau_C^{i*} = 2 - \tau_H^{i*} \quad (13)$$

где i – текущий номер периода опорного сигнала ($i = \overline{0, (K_p - 1)}$).

Особенностью же способа СШИМ_{C2} является то, что на периоде выходного напряжения от такта к такту меняется фактическая амплитуда модулирующего сигнала. Для количественной оценки этого изменения был введен дополнительный коэффициент модуляции K_{M_j} , величина которого на четверти периода выходного напряжения для двух кратностей показана в таблице 8.

Таблица 8 - Числовые значения дополнительного коэффициента модуляции

Номер такта	K_{M_1}	K_{M_2}	K_{M_3}	K_{M_4}	K_{M_5}	K_{M_6}	K_{M_7}
$K_p = 9$	2.0	1.26	1.0	0.786	-	-	-
$K_p = 15$	1.913	1.536	1.561	1.171	1.0	0.858	0.716

С использованием эвристического подхода были синтезированы способы по критерию максимума 1-й гармоники линейного диапазона регулировочной характеристики (РХ) АИН: способы СШИМ_{C3}, СШИМ_{C4}, СШИМ_{C5} и их модификации. Конечной задачей синтеза, как и в предыдущих случаях, являлось формирование соответствующих форм модулирующего и опорного сигналов. При этом также соблюдались условия, обеспечивающие линейность РХ: опорный сигнал должен быть линейным, модулирующий сигнал не должен выходить за пределы, ограниченные амплитудой опорного сигнала.

Поскольку величина 1-й гармоники зависит от M , то первый вариант решения задачи заключался в локальном повышении глубины модуляции. В способе СШИМ_{СЗ} это реализовывалось за счет модуляции амплитуды опорного сигнала модулем сигнала (например, синусоидального) той же частоты и фазы, что и модулирующий сигнал, что отражено на рисунке 9.

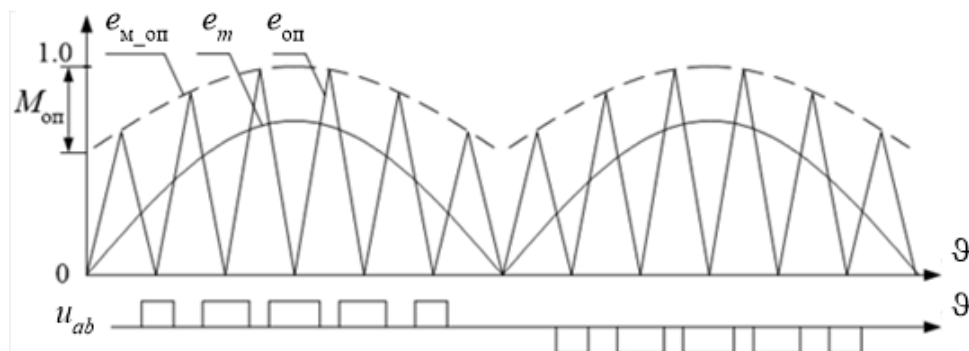


Рисунок 8 - Синтезированный способ СШИМ_{СЗ}

На рисунке 8 параметр $M_{оп}$ представляет собой коэффициентом модуляции опорного сигнала, определяемый как:

$$M_{оп} = E_{м_оп} / E_{оп} \quad (14)$$

где $E_{м_оп}$ – амплитуда сигнала модуляции опорного сигнала.

Для трехфазного АИН был предложен способ СШИМ_{СЗ}, особенностью которого являлось модуляция амплитуды биполярного опорного сигнала огибающими трехфазной системы синусоидальных сигналов.

Для упрощения реализации способа СШИМ_{СЗ} было предложено изменение амплитуды опорного сигнала «перенести» на изменение модулирующего сигнала. Модернизация данного способа представлена на рисунке 10 а.

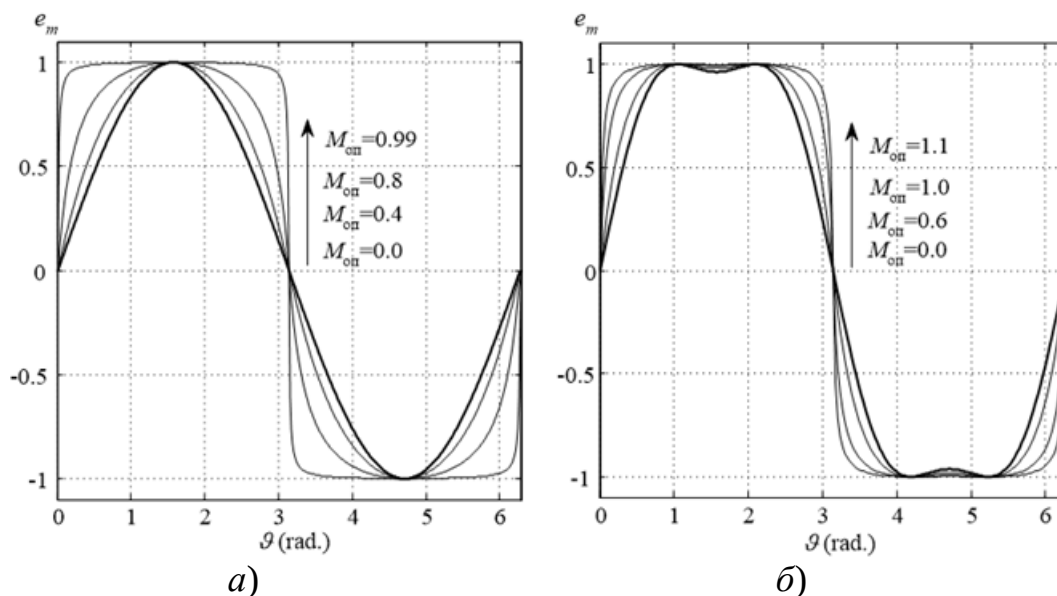


Рисунок 9 - СШИМ_{СЗМ}

Способы СШИМ_{СЗ}, СШИМ_{СЗМ} и СШИМ_{СЗ} представляют собой не конкретный способ, а, скорее, принцип управления. Исходным модулирующим

сигналом и сигналом, изменяющим амплитуду опорного сигнала, может быть модулирующий сигнал, соответствующий любому способу ШИМ. Так на рисунке 10 б, показан модулирующий сигнал для исходного способа СШИМ+3. Для данного варианта, а также для СШИМ+Δ было сделано математическое описание, позволяющее реализовать способы в системах управления.

Однако способы СШИМ_{С3}, СШИМ_{С3М} и СШИМ_{С4}, как показал гармонический анализ, как правило, проигрывают в качестве выходного напряжения исходным способам. Поэтому было принято следующее: расширение линейного диапазона РХ производить за счет ее линеаризации в области перемодуляции, что явилось вторым вариантом решения поставленной задачи.

В соответствии с условиями синтеза было предложено при $M \geq 1$ в модулирующий сигнал вводить аналогичный по частоте и фазе биполярный меандр (способ СШИМ_{С5}) с амплитудой пропорциональной превышению глубины модуляции над единицей. При этом синусоидальный компонент уменьшать так, чтобы амплитуда суммарного модулирующего сигнала оставалась равной единице. Сказанное иллюстрируется рисунком 10 для способа СШИМ. В области перемодуляции ($M=1.0 \div 4/\pi = 1.273$) РХ является продолжением РХ в рабочей области ($M=0 \div 1.0$). При этом амплитуда первой гармоники в относительных единицах меняется в диапазоне $0.866 \div 2\sqrt{3}/\pi = 1.102$ (см. рисунок 10 а).

В области перемодуляции падающая утолщенная пунктирная линия соответствует синусоидальному компоненту модулирующего сигнала E_M и его составляющей в амплитуде 1-й гармонике выходного напряжения АИН, а нарастающая тонкая пунктирная линия аналогичным компонентам меандра.

С целью улучшения качества выходного напряжения была АИН разработана модификация данного способа (СШИМ_{С5М}), которая включает в себя два этапа, соответствующим двум поддиапазонам области перемодуляции. На первом этапе синус заменяется трапецией, на втором трапеция заменяется меандром. Для обоих вариантов было разработано математическое описание.

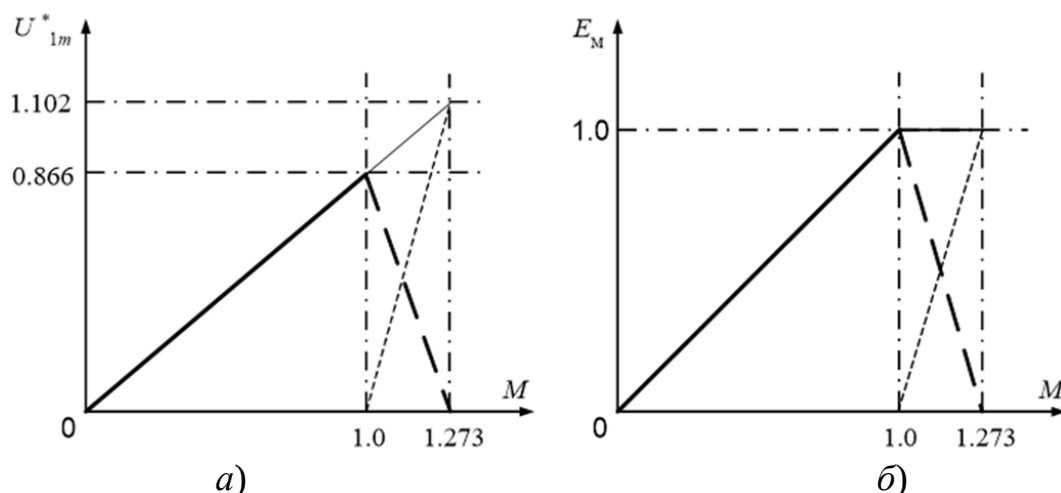


Рисунок 10 – СШИМ_{С5}: а) - амплитуда 1-й гармоники и ее компонентов, б) - амплитуда модулирующего сигнала и его компонентов.

Подобно способам СШИМ_{С3} и СШИМ_{С4} данный способ может применяться и для способов с СНП при управлении трехфазным АИН, а также для двухфазного АИН с СШИМ. В этом случае границы области перемодуляции и ее поддиапазонов соответственно изменятся. Данные варианты также были математически описаны. Рисунок 11 показывает фазные модулирующие сигналы единичной амплитуды, состоящие из синусоидального компонента и меандра.

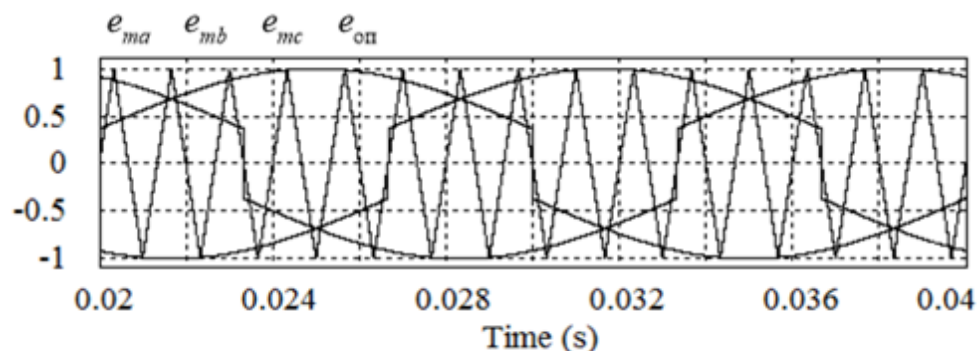


Рисунок 11 – Модулирующие сигналы для способа СШИМ_{С5}

В четвертой главе выполнен сравнительный анализ синтезированных способов с известными способами ШИМ. Сравнение проводилось по следующим параметрам линейного напряжения АИН: амплитуде 1-й гармоники, простому и приведенному ИКГН 1-го порядка. Большинство синтезированных способов может быть использовано для управления и двух- и трехфазным 2У-АИН, соответственно рассматривались данные топологии. Сравнение проводилось с использованием компьютерных моделей, разработанных в имитационной среде моделирования *PSIM*. Сравнительный анализ показал следующее.

Синтезированные по минимуму ИКГН 1-го порядка оптимальные способы ШИМ (СШИМ_{С1} и СШИМ_{С2}) превосходят по данному показателю лучшие современные способы ШИМ в рамках тех условий, для которых они синтезированы. При этом выигрыш по сравнению с синусоидальной ШИМ по качеству выходной энергии (величине ИКГН 1-го порядка) в зависимости от условий при $M=1$ может составлять 17-23 %. Улучшение во всех случаях обусловлено смещением в той или иной форме амплитуд гармоник в область высоких частот.

Синтезированные по критерию максимума 1-й гармоники линейного диапазона регулирования способы СШИМ_{С3} и СШИМ_{С5} расширяют линейность РХ вплоть до режима ОШИР, способ СШИМ_{С4}, предназначенный для управления трехфазным АИН, во всех вариантах использования расширяет линейность РХ до относительного уровня 1.05.

Способы СШИМ_{С3}, СШИМ_{С4} и СШИМ_{С5} при определенных условиях (с точки зрения кратности и поддиапазонов глубины модуляции) обеспечивают лучшее качество выходной электроэнергии по сравнению со способами ШИМ, в рамках которых они реализуются.

На основании анализа полученных характеристик определены области целесообразного применения синтезированных способов.

Пятая глава посвящена микропроцессорной реализации синтезированных способов ШИМ в системах управления (СУ) АИН и АИТ, при этом было выполнено следующее.

1. Проанализировано единственное различие, согласно концепции единства АИН и АИТ, существующее между данными ПП, а именно: разная реализация в СУ преобразователями способов ШИМ. Показано, что основные процессы по реализации ШИМ в системах управления АИН и АИТ одинаковы, что определяет **общность инверторов с точки зрения управления** и унификацию подходов и средств реализации для них способов ШИМ.

2. Отличие в работе СУ инверторами имеет место только на ее заключительном этапе - при синтезе собственно импульсов управления, реализующих текущее состояние конкретного АИ. Показаны два варианта синтеза импульсов управления на примере трехфазного 2У-АИТ, из которых наиболее простым и универсальным является табличный. Его эффективность также продемонстрирована на примере синтеза импульсов управления пятифазным АИТ.

3. Рассмотрены основы микропроцессорной реализации способов ШИМ, ориентированные на использование возможностей специализированных для устройств силовой электроники контроллеров класса «Motion Control».

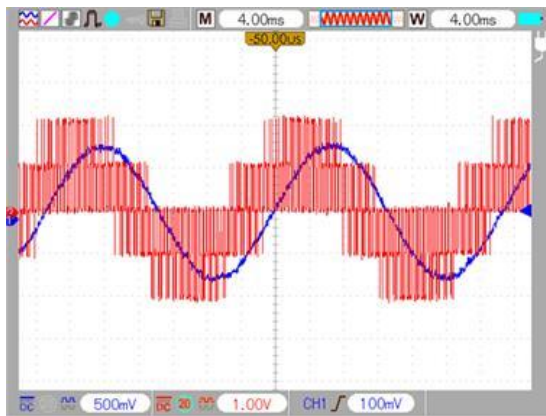
4. Показано, что все синтезированные в данной работе способы ШИМ, использующие для своей реализации (вертикальным методом) нестандартные формы опорных и модулирующих сигналов, могут быть реализованы на упомянутых специализированных микроконтроллерах, с использованием их внутренних программных и аппаратных средств, в системах управления АИН.

5. Даны конкретные рекомендации по микропроцессорной реализации синтезированных способов ШИМ, представленные в виде формул, необходимых для расчета параметров программного обеспечения, блок-схем алгоритмов функционирования и блок-схем аппаратных средств.

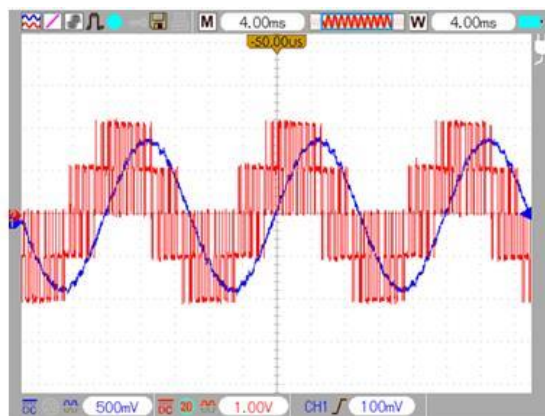
6. Показано, что существующие специализированные модули ШИМ не в полной мере удовлетворяют требованиям реализации ШИМ в СУ трехфазными АИТ. Для выполнения на их основе данной задачи управления необходимо либо значительно усложнять программное обеспечение, либо использовать внешние аппаратные средства. Предложена реализация данных двух вариантов построения системы управления трехфазным АИТ на базе упомянутых специализированных микроконтроллеров. Показаны их достоинства и недостатки, которые могут стать основой при выборе конкретного микропроцессорного варианта с учетом заданных к МПСУ требований.

7. Для проверки предложенных рекомендаций для способов СШИМ_{С3} и СШИМ_{С5} применительно к трехфазному АИН на языке Си разработаны и отлажены тестовые программы, предназначенные для реализации на специализированном микроконтроллере. Физический эксперимент, выполненный с использованием данных программ, показал работоспособность синтезированных способов ШИМ и правильность предложенных для их микропроцессорной реализации инженерных подходов и рекомендаций.

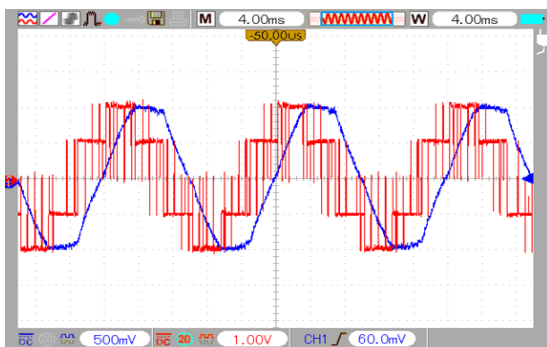
В качестве примера на рисунке 12 показаны осциллограммы напряжений и токов трехфазного АИН, управляемого в рабочей области способом СШИМ, а в области перемодуляции способом СШИМ_{С5}. На рисунке 13 представлены фотографии станции частотного управления насосными агрегатами на базе преобразователей СЧ500 ТОО «СИБИРЬ-МЕХАТРОНИКА», в которых, в частности, использовались результаты настоящей диссертационной работы.



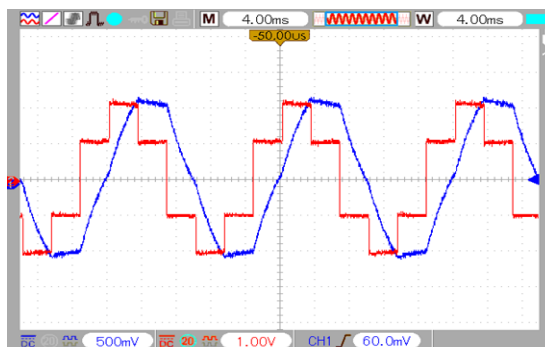
а) СШИМ, $M=0.77$, $F_{\text{вых}}=38,5$ Гц



б) СШИМ, $M=1.0$, $F_{\text{вых}}=50$ Гц



в) СШИМ, $M=1.2$, $F_{\text{вых}}=50$ Гц



г) СШИМ, $M=1.273$, $F_{\text{вых}}=50$ Гц

Рисунок 12 – Осциллограммы напряжений и токов АИН с СШИМ_{С5}



а)



б)

Рисунок 13 – а) ВНС-2, 400 кВт, 0.69 кВ; б) Шкаф ПЧ СЧ500 250 кВт, 0.69 кВ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации проведены комплексные исследования автономных инверторов напряжения и тока с ШИМ с целью повышения их эффективности с точки зрения преобразования электроэнергии.

Основные результаты теоретических и практических исследований состоят в следующем:

1. Выдвинута и обоснована концепция множественности форм представления способов ШИМ, которые предложено назвать *моделями* способа управления. Каждая модель позволяет оценить характеристики и/или возможности способа управления с соответствующих позиций.

2. Выдвинута и обоснована концепция единства АИН и АИТ, согласно которой оба типа инверторов можно рассматривать как единый, унифицированный класс вентильных преобразователей с однократным преобразованием электроэнергии постоянного тока в энергию переменного тока, для которых характерны однотипные способы управления и аналитические выражения, описывающие входные и выходные переменные. Существующие же различия между двумя типами АИ можно свести к работе систем управления, по-разному реализующими один и тот же способ управления.

3. Разработана единая методика расчета показателей качества электроэнергии, позволяющая вывести аналитические соотношения для действующего значения и коэффициента гармоник входных и выходных переменных в общем случае многоуровневых автономных инверторов с ШИМ. В основе методики лежит свойство импульсов указанных переменных модулироваться по длительности в соответствии с виртуальным «линейным модулирующим сигналом».

4. В процессе обобщенного анализа получены в замкнутом виде формулы для действующего значения и коэффициента гармоник выходного напряжения и входного тока АИН для различных топологий и способов ШИМ. На основании полученных результатов сформулирован «принцип подобия способов», позволяющий адекватно, с единых позиций сравнивать способы ШИМ как по входным, так и по выходным энергетическим характеристикам АИН. Он позволил все многообразие выведенных для линейного напряжения формул свести к единому обобщенному набору, справедливому для m -фазного L -уровневого АИН. При этом различные способы ШИМ и топологии АИН отличаются только диапазоном линейного регулирования основной гармоники напряжения. Выявлено, что для входного тока и фазного напряжения ППС для разных способов ШИМ только в рамках одной топологии. На примере входных и выходных дуальных переменных трехфазных двухуровневых топологий показана процедура переноса на дуальные входные и выходные переменные АИТ соотношений, полученных для переменных АИН.

5. Предложен новый показатель оценки эффективности преобразования ЭЭ автономными инверторами - приведенный интегральный коэффициент гармоник напряжения (ИКГН) q -го порядка, учитывающей как качество выходной (входной) энергии, так и относительные коммутационные потери в инверторе.

Показана его эффективность при сравнении рассмотренных способов ШИМ. Были выведены аналитические и аппроксимирующие выражения для ИКГН 1-го - 3-го порядка для современных способов ШИМ. С использованием прямых методов анализа для типовых топологий выходных цепей АИН и АИТ выведены соотношения для коэффициентов гармоник напряжения и тока нагрузки, в которых обязательным элементом является соответствующий ИКГН выходной переменной.

6. Предложена и обоснована методика формального синтеза способов ШИМ по заданному критерию оптимизации. По предложенной методике и минимуму ИКГН 1-го порядка синтезированы способы ШИМ для управления двухфазным и трехфазным АИН (способы СШИМ_{C1} и СШИМ_{C2}). С использованием эвристического подхода были разработаны три способа ШИМ (СШИМ_{C3} ÷ СШИМ_{C5}), для которых критерием синтеза являлся максимум линейного диапазона регулирования первой гармоники выходного напряжения АИН.

7. Разработаны рекомендации, блок-схемы алгоритмов и аппаратных средств, позволяющие реализовать синтезированные способы ШИМ в микропроцессорных системах управления автономных инверторов напряжения и тока.

Сформулированные концепции и принципы, выведенные обобщенные соотношения для показателей качества электроэнергии автономных инверторов, а также соотношения для приведенных интегральных коэффициентов являются вкладом в развитие теории ШИМ в силовой электронике.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В журналах, рекомендованных ВАК России и зарубежных изданиях, включенных в системы цитирования:

1. Баховцев И.А., Зиновьев Г.С., Попов В.И., и др. Способы широтно-импульсной модуляции в автономных инверторах для частотного электропривода // Электротехника. – № 3. – 1990. – С. 46-50.

2. Баховцев И.А., Зиновьев Г.С., Петров Э.Л., Уланов Е.И. Управление инверторным электроприводом со слежением за мгновенными значениями момента и обобщенного вектора потокосцепления // Известия вузов. Приборостроение. – 1996. – Т.39. – № 3. – С. 42-44.

3. Баховцев И.А. Использование трехфазного АИН с ШИМ для управления асинхронным исполнительным двигателем // Электротехника. – № 6. – 2008. – С. 45-51.

4. Баховцев И.А. Входные интегральные характеристики двухуровневых инверторов напряжения с ШИМ / И.А. Баховцев // Научный вестник Новосибирского государственного университета. – № 1 (38). – 2010. – С. 111-117.

5. Баховцев И.А. Анализ электрических соотношений в автономных инверторах с ШИМ на основе принципа дуальности // Электротехника. – № 6. – 2011. – С. 59-63.

6. Баховцев И.А. Внутренние характеристики трехфазных мостовых автономных инверторов напряжения и тока с ШИМ. / И.А. Баховцев // Научный вестник Новосибирского государственного университета. – № 1 (46). – 2012. С. 117-126.
7. Баховцев И.А. Анализ выходных характеристик трехуровневого инвертора напряжения с ШИМ / И.А. Баховцев // Радиопромышленность. – 2012. – Вып. 1. – С. 124-133.
8. Баховцев И.А. Анализ выходных характеристик однофазного инвертора напряжения с гистерезисным управлением / И.А. Баховцев // Доклады ТУСУРа. – 2013. – № 3 (29). – С. 58-62.
9. Баховцев И.А. Панфилов Д.В. Построение трехфазного трехуровневого инвертора напряжения на базе квази-импедансного преобразователя. – Научный вестник НГТУ № 4 (53). – 2013. С. 144-149.
10. Баховцев И.А. Анализ выходного напряжения многофазного многоуровневого инвертора напряжения с ШИМ / И.А. Баховцев // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2014. – № 11. – С. 57-64.
11. Баховцев И.А. Анализ выходного напряжения многофазных четырехуровневых инверторов напряжения с ШИМ / И.А. Баховцев // Доклады ТУСУРа. – 2014. – № 3 (33). – С. 175-180.
12. Мальнев А.И. Обзор многоуровневых инверторов тока / А.И. Мальнев, И.А. Баховцев, Г.С. Зиновьев // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326. – № 7. – С. 15-26.
13. Панфиловым Д.В., Баховцев И.А., Гусев Х.Х. Модификация топологии квази-импедансного инвертора для автономных систем электроснабжения. – Доклады академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2015. – № 4 (29). – С. 105-117.
14. Панфилов Д.В. Модифицированный квази-импедансный инвертор напряжения с улучшенной внешней характеристикой / Д.В. Панфилов, И.А. Баховцев, А.А. Гусев // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2016. – № 1 (67). – С. 33-40.
15. Баховцев И.А. Обобщенный анализ выходной энергии многофазных многоуровневых инверторов напряжения с широтно-импульсной модуляцией / И.А. Баховцев, Г.С. Зиновьев // Электричество. – 2016. – № 4. – С. 26-33.
16. Колмаков Н.М. Анализ гистерезисного управления по напряжению автономного инвертора напряжения / Н.М. Колмаков, И.А. Баховцев, А.Г. Гарганеев // Доклады ТУСУРа. – 2016. – Том 19, № 2. – С. 84-89.

Другие статьи, доклады

17. Гармонический анализ входных токов трехфазных инверторов напряжения с синусоидальной ШИМ / И.А. Баховцев, В.И. Попов // Преобразовательная техника: Межвуз. сборник научн. трудов. – Новосибирск: НЭТИ, 1978. – С. 103-112.

18. Баховцев И.А. Инвертор напряжения с улучшенным качеством выходной энергии для электропривода / И.А. Баховцев, А.Н. Коновалов, Г.С. Зиновьев, В.И. Попов // Проблемы преобразовательной техники: Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции. – Киев, 1979, ч. 5.

19. Аникеева Н.И. Определение качества входного и выходного токов инвертора напряжения с ШИМ / Н.И. Аникеева, И.А. Баховцев // Преобразовательная техника: Межвуз. сборник научн. трудов. – Новосибирск: НЭТИ, 1979. – С. 56-66.

20. Аникеева Н.И. Влияние алгоритмов управления инверторов напряжения с ШИМ на энергетические характеристики / Н.И. Аникеева, И.А. Баховцев, Г.С. Зиновьев // Тиристорные преобразователи частоты: Межвуз. сборник научн. трудов. – Новосибирск: НЭТИ, 1981. – С. 29-46.

21. Баховцев И.А. Применение таймеров для формирования управляющих импульсов в вентильных преобразователях / И. А. Баховцев, Н. А. Красиков // Силовая полупроводниковая техника: Межвуз. сб. научн. трудов. Новосибирск: НЭТИ, 1982. - С. 108-115.

22. Аникеева Н.И. Микропроцессорные системы управления инверторами напряжения с ШИМ в системе частотного электропривода / Н.И. Аникеева, И.А. Баховцев, Г.С. Зиновьев, В.И. Попов // Силовые вентильные преобразователи: Межвуз. сб. научн. трудов. – Новосибирск: НЭТИ, 1984. – С. 103-118.

23. Баховцев И.А. О синтезе алгоритмов управления для АИН с ШИМ / И. А. Баховцев, Г. С. Зиновьев // Тиристорные преобразователи: Межвуз. сб. научн. трудов. – Новосибирск: НЭТИ, 1985. – С. 23-34.

24. Аникеева Н.И. Микропроцессорная система управления частотным электроприводом с инвертором напряжения / Н. И. Аникеева, И. А. Баховцев, Г. С. Зиновьев, Б. В. Лейкин // Преобразовательная техника: Межвуз. сб. на-учн. трудов. – Новосибирск: НЭТИ, 1986. – С. 64-70.

25. Баховцев И.А. Анализ качества преобразования энергии в АИН с ШИМ / И.А. Баховцев, Г.С. Зиновьев // Силовые тиристорные преобразователи: Межвуз. сборник научн. трудов. – Новосибирск: НЭТИ, 1987. – С. 3-12.

26. Аникеева Н.И. Разработка МПСУ на базе МПК для частотного электропривода с АИН / Н. И. Аникеева, И. А. Баховцев, А. В. Шищенко, Э. Л. Петров // Силовые преобразователи электрической энергии: Межвуз. сб. научн. трудов. – Новосибирск: НЭТИ, 1989. – С. 101-112.

27. Об одном способе синтеза энергооптимальных алгоритмов управления инверторов напряжения с ШИМ / И.А. Баховцев // Труды III международной конференции Актуальные Проблемы Электронного Приборостроения. - АПЭП-96. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1996. – С. 100-101.

28. Баховцев И.А. Анализ способов управления инверторов напряжения с синусоидальной ШИМ / И.А. Баховцев // Труды IV международной научно-технической конференции Актуальные Проблемы Электронного Приборостроения. - АПЭП-98. - Том 7. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1998. – С. 64-68.

29. Баховцев И.А. Контроллер для источников бесперебойного питания / И.А. Баховцев, Д.В. Коробков, А.Н. Шалимов // Труды VI международной кон-

ференции Актуальные Проблемы Электронного Приборостроения. - АПЭП-2002. – Том 6. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – С. 165-166.

30. Баховцев И.А. Исследование АИТ с ШИМ в системе генерирования электрической энергии / И.А. Баховцев, А.А. Щербелев // Материалы VII международной конференции Актуальные Проблемы Электронного Приборостроения. - АПЭП-2004. – Том. 6. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – С. 119-122.

31. Баховцев И.А. Микропроцессорные системы управления устройствами силовой электроники: учебное пособие. В 2 ч. / И.А. Баховцев. – Новосибирск: Издательство НГТУ, 2006. – Ч 1. – 72 с.

32. Баховцев И.А. Интегральные характеристики выходного напряжения трехфазного АИН с векторной ШИМ / И.А. Баховцев // Техническая электродинамика, тематич. выпуск ПСЭ. – Киев, 2008, Ч. 6. – С. 88-91.

33. Баховцев И.А. Сравнительный анализ выходного напряжения АИН с синусоидальной и векторной ШИМ / И.А. Баховцев // Техническая электродинамика, тематич. выпуск СЭЭ. – Киев, 2008, Ч. 3. – С. 63-66.

34. Баховцев И.А. Сравнительный анализ способов управления двухуровневым АИН с ШИМ / И.А. Баховцев // Труды IX международной конференции Актуальные Проблемы Электронного Приборостроения. - АПЭП-2008. – Том 7. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. – С. 30-34.

35. Баховцев И.А. Микропроцессорные системы управления устройствами силовой электроники: учебное пособие. В 2 ч. / И.А. Баховцев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – Ч 2. – 110 с.

36. Баховцев И.А. Способ ШИМ с детерминированным изменением частоты опорного сигнала / И.А. Баховцев, А.К. Ракитин // Труды X международной конференции Актуальные Проблемы Электронного Приборостроения. - АПЭП-2010. – Том 7. – Новосибирск: Издательство НГТУ, 2010. – С. 68-73.

37. Bakhovtsev I.A. New PWM Methods with Deterministic Change of Carrier Frequency / Bakhovtsev I.A., Rakitin A.K. // XII International Conference and Seminar on micro/nanotechnologies and electron device (EDM-2011). – Erlagol, Altai. – June 30 – July 4. – P. 406-410.

38. Kolmakov N.M., Bakhovtsev I.A. Three-Phase current source inverter with hysteresis control in voltage source mode. – XVI International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM'2015). – Erlagol, Altai. – P. 429-432.

39. Kolmakov N.M. Modulation features of VSI with hysteresis voltage control / N.M. Kolmakov, I.A. Bakhovtsev // XII International Conference and Seminar on micro/nanotechnologies and electron device (EDM-2011). – Erlagol, Altai. – June 30 – July 4. – P. 471-475.

40. Зиновьев Г.С. Электромагнитная совместимость устройств силовой электроники. Силовые электронные трансформаторы-2: учебно-методическое пособие. / Г.С. Зиновьев, Е.Д. Баранов, И.А. Баховцев, Н.Н. Лопаткин, Г.В. Чиркова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – 115 с.

Авторские свидетельства и патенты на изобретения

41. А.С. № 1102016 СССР. Устройство для управления преобразователем частоты / И.А. Баховцев, Г.С. Зиновьев; опубл. 07.07.84, Бюл. № 25.
42. Патент № 2064730 РФ, МПК H02M 7/12, 7/48. Устройство для управления вентильным преобразователем / И.А. Баховцев, Г.С. Зиновьев; опубл. 27.07.96, Бюл. № 21.
43. Патент РФ № 2080735. Автономный инвертор / Г.С. Зиновьев, В.И. Попов, Н.И. Аникеева, И.А. Баховцев; опубл. 1997, Бюл. № 15.
44. Патент № 2556874 РФ, МПК H02M 7/515, 7/527, 7/525, H02P 27/08. Способ управления автономным инвертором / И.А. Баховцев; опубл. 20.07.15, Бюл. № 20.
45. Патент № 2558722 РФ, МПК H02M 7/527, 7/537, 7/53846, 7/5395, H02P 27/08. Способ управления трехфазным автономным инвертором / И.А. Баховцев; опубл. 10.08.15, Бюл. № 22.
46. Патент № 2564991 РФ, МПК H02M 7/53846, H02P 27/08. Способ управления автономным инвертором / И.А. Баховцев; опубл. 10.10.15, Бюл. № 28.
47. Патент № 2578042 РФ, МПК H02M 7/42, 7/5387, 7/00. Трехфазный Z-инвертор / И.А. Баховцев, Д.В. Панфилов; опубл. 20.03.16, Бюл. № 8.