

В диссертационный совет Д 212.298.05
при федеральном государственном
автономном образовательном
учреждении высшего образования
«Южно-Уральский государственный
университет (национальный
исследовательский университет)».
454080, г. Челябинск, пр-т. им. В.И.
Ленина, 76

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук, старшего научного сотрудника Полякова Владимира Николаевича на диссертационную работу Баховцева Игоря Анатольевича **«Анализ и синтез энергооптимальных способов управления инверторами с ШИМ»**, представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.12 – «Силовая электроника»

1. Актуальность темы диссертации

В настоящее время в связи с внедрением новых технологических процессов и оборудования в различных сферах общественного производства значительно возрос спрос на устройства силовой электроники, среди которых значительную долю составляют автономные инверторы напряжения и тока с различными схемными решениями и мощностью. Особенно широко автономные инверторы используются в регулируемом электроприводе, в автономных и централизованных системах генерирования электричества, на транспорте и возобновляемой энергетике. Наблюдается также потребность в автономных инверторах в области энергоемких технологий, что в свою очередь стимулирует разработку высоковольтных многофазных автономных инверторов и способов их управления. В этой связи важную роль приобретают вопросы повышения энергетической эффективности преобразования электрической энергии автономными инверторами с широтно-импульсной модуляцией выходного напряжения (тока), что требует совершенствования аналитических и численных методов анализа энергетических характеристик автономных инверторов, разработки критериев оценки энергоэффективности и на их основе методик синтеза энергоэффективных алгоритмов управления автономными инверторами по заданным критериям. Именно решению этих актуальных задач посвящена диссертационная работа Баховцева И.А.

2. Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Научные положения, приведенные в диссертации, а также сделанные автором выводы и рекомендации в рамках принятых допущений обоснованы и аргументированы. Их достоверность подтверждается корректностью постановок задач исследования и выбранных методов анализа. Большой объем расчетных данных, приведенные в диссертации аналитические соотношения и графические зависимости, сравнительная оценка аналитических исследований с данными компьютерного моделирования позволяет судить об адекватности полученных результатов. Обоснованность и достоверность результатов также подтверждается публикациями и апробацией основных положений диссертационной работы на конференциях международного и всероссийского уровня.

3. Новизна научных положений и значение выводов и рекомендаций для науки и практики

Научная новизна диссертационной работы заключается в методологии анализа и синтеза способов управления автономными инверторами напряжения и тока на основе обоснованных автором обобщенных показателей и критериев оценки качества функционирования инверторов. В результате систематизированы известные способы управления и найдены эффективные (в смысле энергетических критериев) новые способы управления инверторами с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) выходного напряжения (тока).

В частности:

3.1. На основании обзора скалярных и векторных способов ШИМ доказано, что последние являются другой формой представления соответствующих скалярных способов. Развитием этого вывода стала предложенная концепция о множественности форм представления способов управления инверторами, каждая из которых позволяет с определенной точки зрения оценить характеристики и возможности способа управления. В результате дана новая трактовка способов управления.

3.2. Используя принцип дуальности, который характерен для автономных инверторов тока и напряжения, доказано, что формально их можно рассматривать как единый унифицированный класс полупроводниковых 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. Это позволило в дальнейшем создать обобщенную методику синтеза и анализа энергоэффективных способов управления инверторами с ШИМ.

3.3. На основе анализа коммутационных процессов в трехфазном двухуровневом автономном инверторе напряжения (АИН) с нагрузкой без нулевого провода показано, что длительности импульсов его входных и выходных переменных на интервалах периода изменяются по соответствующему закону межфазных или линейных модулирующих сигналов. Переход к усредненным значениям на такте позволил получить непрерывные во времени функции изменения длительностей, основу которых составляет тот или иной линейный модулирующий сигнал. Добавление к ним закона изменения амплитуд переменных на каждом интервале позволило аналитически описать переменную на каждом интервале и периоде в целом. Такое аналитическое описание входных и выходных переменных стало основой универсальной методики вывода выражений для различных показателей, характеризующих переменные, в частности действующее значение, полезную составляющую и коэффициент гармоник как показатель качества электрической энергии. Разработанная методика справедлива также для анализа входных и выходных переменных многоуровневых инверторов напряжения.

3.4. Получены обобщенные аналитические выражения для фазных напряжений и входных токов АИН для рассмотренных способов ШИМ в рамках одной топологии, а для линейного напряжения – для m -фазного L -уровневого АИН, управляемого теми же способами ШИМ.

3.5. Предложен показатель оценки эффективности преобразования электрической энергии автономными инверторами – приведенный интегральный коэффициент гармоник напряжения (ИКГН) q -го порядка, который можно трактовать как персональную характеристику способа ШИМ, учитывающую как качество выходной (входной) энергии, так и косвенно коммутационные потери в инверторе. Приведенные ИКГН 1-го, 2-го и 3-го порядков для большинства традиционных способов ШИМ применительно к двух- и трехуровневым АИН могут использоваться для расчета энергетических показателей АИН прямыми методами.

3.6. Разработана методика синтеза способов ШИМ по заданным критериям эффективности, отличающаяся тем, что она нацелена на реализацию синтезированных способов ШИМ с вертикальным принципом сравнения модулирующего и опорного сигналов и повышение динамических

характеристик инверторов по сравнению с традиционными оптимальными способами ШИМ. Ряд синтезированных способов ШИМ защищен патентами РФ.

3.7. Практическая значимость результатов работы подтверждается внедрением их на предприятиях г. Новосибирска: в ФГУП ПО «СЕВЕР» при подготовке эскизных проектов блока управления (КТНЦ) для электромеханического усилителя рулевого управления, мехатронной системы ПЧ-ПСПЧ-Д и преобразователей ПЧ-ПСПЧ-Д1 и ПЧА2; в ЗАО «НОЭМА» при разработке и изготовлении полупроводниковых интеллектуальных регуляторов температуры «ИРТ-1»; в ОАО «ИПФ» при разработке и изготовлении электронного блока управления двигателем постоянного тока для стендового моделирования канала тангажа летательного аппарата; в ТОО «СИБИРЬ-МЕХАТРОНИКА» при разработке станций частотного управления насосными агрегатами на базе преобразователей частоты серии СЧ500; в учебном процессе на кафедре электроники и электротехники Новосибирского государственного технического университета.

4. Заключение о соответствии диссертации установленным критериям

Диссертационная работа Баховцева И.А. отвечает критериям, которые установлены в положении «О порядке присуждения ученых степеней», утвержденном Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842. В ней соблюдены следующие принципы соответствия.

4.1. Указанная диссертантом *цель работы* – повышение энергетической эффективности преобразования электрической энергии автономными инверторами с ШИМ – *реализована в рамках представленной диссертационной работы.*

4.2. Автореферат диссертации Баховцева И.А. *соответствует диссертационной работе* по всем квалификационным признакам: по цели, задачам исследования, актуальности, научной значимости, новизне, практической ценности и др.

4.3. Основные *выводы и результаты* диссертационной работы *соответствуют поставленным задачам исследований* и сформулированы автором структурно содержательно.

4.4. Научные *публикации* Баховцева И.А. *соответствуют диссертационной работе* и с достаточной полнотой отражают ее существо и основные результаты исследований.

4.5. Тема и содержание диссертации соответствуют паспорту специальности 05.09.12 – Силовая электроника (см. курсив)

- по направлению исследования – «научной специальности, объединяющей исследования по теории ... использования электрических и электромагнитных процессов в силовых, полупроводниковых преобразователях ... и отличающейся использованием электронных приборов в качестве основных, силовых элементов структуры преобразователей».

- по области исследования -- п. 2. «Теоретический анализ ... процессов преобразования (... инвертирования, импульсного, частотного ... регулирования ...) в устройствах силовой электроники с целью улучшения их технико-экономических и эксплуатационных характеристик», п.3. «Оптимизация преобразователей, их отдельных, функциональных узлов и элементов», п.5. «Разработка научных подходов, методов, ..., обеспечивающих адекватное отражение... физической сущности электромагнитных процессов и законов функционирования устройств силовой электроники».

- по целям исследования, – «совершенствование теоретической и технической базы преобразовательных устройств, создания новых преобразователей, систем ... управления ..., обладающих высокой энергетической эффективностью...»

Диссертационная работа Баховцева И.А. написана доступным языком, корректным в научном и техническом отношении. Материалы и результаты исследований изложены в объеме, достаточном для понимания, что существенным образом помогает их восприятию. Это позволило автору раскрыть научно-техническую значимость диссертационной работы на необходимом для этого квалификационном уровне. Редакционное оформление диссертации замечаний не вызывает.

4.6. Содержание диссертации соответствует содержанию опубликованных работ. Результаты исследования опубликованы в 47 печатных работах, которые включают 16 статей в журналах, рекомендуемых ВАК РФ, 10 тезисов докладов в материалах международных и всероссийских научных конференций, 6 патентов и одно авторское свидетельство СССР. В представленных публикациях достаточно полно отражены все основные положения, выводы и рекомендации диссертации.

5. Анализ содержания диссертации

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, изложены научные положения, выносимые на публичную защиту, научная новизна, теоретическая и практическая ценность результатов, приведено доказательство обоснованности и достоверности научных положений и выводов. Приведены сведения об апробации работы.

Первая глава посвящена анализу топологий автономных инверторов напряжения и тока и эволюции методов ШИМ. Проведенное аналитическое исследование позволило сделать ряд важных выводов по силовым схемам автономных инверторов и способам их управления, а также обосновать цель и задачи диссертационной работы.

Во второй главе дается подробный теоретический анализ энергетических показателей автономных инверторов с традиционными способами ШИМ. Проведена систематизация способов ШИМ по признакам введения в синусоидальный модулирующий сигнал сигнала нулевой последовательности, а также непрерывности и дискретности сигнала нулевой последовательности. Определены объект исследования (АИН) и энергетические показатели. Обоснованы допущения для вывода энергетических показателей. Предложена методика анализа энергетических показателей, применимая как для двухуровневых, так и для многоуровневых АИН. Анализ временных диаграмм входных и выходных переменных инверторов позволил ввести понятие линейного модулирующего сигнала. В этой же главе по предложенной методике проведен анализ входных и выходных характеристик m -фазного двухуровневого АИН для рассматриваемых способов ШИМ. Важным является то, что результаты анализа характеристик АИН позволили вывести принцип подобия способов ШИМ, на основе которого получены аналитические выражения характеристик для m -фазных L -уровневых АИН. Доказано, что действующее значение и коэффициент гармоник входных и выходных переменных АИН не могут служить критериями сравнения способов ШИМ, т.е. для оценки их отличительных свойств нужны другие энергетические показатели качества, например, интегральные коэффициенты гармоник напряжения (ИКГН) q -порядка. Предложено в качестве критериев эффективности энергетических процессов АИН использовать ИКГН 1-го порядка.

В третьей главе выполнен синтез энергооптимальных способов управления автономными инверторами с ШИМ. Разработана общая процедура синтеза способов управления по заданному критерию эффективности. В связи со сложностью решения проблемы предложен

способ декомпозиции задачи синтеза. Дано обоснование методики синтеза закона модуляции по критерию минимума ИКГН 1-го порядка. Рассмотрены особенности синтеза закона модуляции и процедуры реализации способа управления двухфазным и трехфазным инвертором напряжения при различной кратности частот опорного и модулирующего сигналов. Кроме того, в этой же главе выполнен синтез способов управления инвертором напряжения эвристическими методами. Обсуждаются решения задачи расширения линейного диапазона регулировочной характеристики АИН, модуляции амплитуды опорного сигнала и вопросов модификации формы модулирующего сигнала в области перемодуляции.

Четвертая глава посвящена сравнительному анализу синтезированных способов с известными способами ШИМ с привлечением показателей линейного напряжения АИН: амплитуды 1-й гармоники и ИКГН 1-го порядка. Сравнение проводилось с использованием компьютерных моделей. Важным выводом сравнительного анализа является то, что синтезированные по минимуму ИКГН 1-го порядка способы превосходят по критерию энергоэффективности применяемые на практике способы ШИМ.

В пятой главе рассмотрена микропроцессорная реализация синтезированных оптимальных способов ШИМ в системах управления автономных инверторов тока и напряжения. Показано, что основные процессы по реализации ШИМ в системах управления автономными инверторами тока и напряжения одинаковы, что определяет общность инверторов с точки зрения управления и унификации подходов и средств реализации способов широтно-импульсной модуляции. Отличие в работе систем управления состоит только в формировании импульсов управления. В этой главе рассмотрены основы микропроцессорной реализации способов ШИМ на основе контроллеров класса «Motion Control». Рассмотрены особенности реализации и даны рекомендации по микропроцессорной реализации оптимальных способов ШИМ.

6. Замечания и дискуссионные положения

По содержанию диссертации имеются следующие вопросы и замечания:

6.1. В диссертационной работе автор часто оперирует термином «большая кратность», но не раскрывает его содержания.

6.2. Синтезированные способы ШИМ можно использовать в многоуровневых АИН. Однако автор не сформулировал рекомендаций по их использованию в реальных условиях небаланса напряжения на

конденсаторах, например, в преобразователях с фиксирующими диодами или с фиксирующими конденсаторами.

6.3. В разных применениях (системы генерирования электроэнергии, электроприводы и др.) имеют место разные условия работы автономного инвертора с точки зрения управления. В диссертации не даны подробные рекомендации по режимам работы и условиям использования (частота выходного напряжения, частота коммутации, глубина модуляции и т.д.) синтезированных способов ШИМ в конкретных областях применения.

6.4. При расчете прямыми методами коэффициентов напряжения и тока нагрузки для разных топологий выходных цепей автономных инверторов напряжения и тока (стр. 190-192) автор не остановился на вопросе дуальности, что могло бы расширить значимость данного принципа на анализ преобразователей.

6.5. Синтезированные способы ШИМ сравниваются в диссертации только по критериям синтеза – интегральному коэффициенту гармоник и диапазону линейного регулирования основной гармоники выходного напряжения. Нет оценки эффективности разработанных способов по статическим и динамическим потерям и по загрузке вентиля по току.

Указанные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы Баховцева И.А., ее научную новизну и значимость.

7. Общее заключение

Диссертационная работа Баховцева И.А. является самостоятельной законченной научно-квалификационной работой, обладающей признаками актуальности, новизны и практической значимости. В ней на основании выполненных автором исследований решена крупная научно-техническая проблема, имеющая важное хозяйственное значение, которое заключается в теоретическом обосновании подхода, способов и алгоритмов управления, повышающих энергоэффективность преобразования электрической энергии широко используемыми в различных отраслях автономными инверторами напряжения и тока с широтно-импульсной модуляцией.

По совокупности полученных результатов считаю, что диссертационная работа Баховцева Игоря Анатольевича «Анализ и синтез энергооптимальных способов управления автономными инверторами с ШИМ» по объему исследований, их глубине, научной и практической значимости удовлетворяет требованиям, предъявляемым к научно-квалификационным работам на соискание ученой степени доктора наук согласно п.п. 9, 10, 11, 13,

14 Положения о присуждении ученых степеней от 24 сентября 2013 г. № 842 с изменениями постановления Правительства Российской Федерации от 21 апреля 2016 г. № 335 “О внесении изменений в Положение о присуждении ученых степеней”, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.12 – «Силовая электроника».

Официальный оппонент,
доктор технических наук,
старший научный сотрудник, профессор
кафедры «Электропривод и автоматизация
промышленных установок» ФГАОУ ВО
«Уральский федеральный университет
имени первого Президента
России Б.Н. Ельцина»



Поляков Владимир Николаевич

1 декабря 2017 г.

620002, г. Екатеринбург, ул. Мира 19

Тел. +7(343)3754646

E-mail: v.n.polyakov@urfu.ru

Подпись проф. Полякова В.Н. заверяю

