

## О Т З Ы В

на автореферат диссертации Баховцева Игоря Анатольевича  
«Анализ и синтез энергооптимальных способов управления инверторами  
с ШИМ» на соискание ученой степени доктора технических наук  
по специальности 05.09.12 - силовая электроника

Появление на рынке силовой электроники новых полупроводниковых приборов (GTO, IGBT, MOSFET), их дальнейшее развитие и совершенствование оказало существенное влияние на схемотехнику преобразовательных устройств и на использование метода широтно-импульсной модуляции (ШИМ) как основного принципа управления. Последние десятилетия характеризуются возрастающим интересом к применению многоуровневых полупроводниковых преобразователей частоты, основанных, прежде всего, на автономных инверторах напряжения (АИН) и тока (АИТ).

Использование новых схем многоуровневых автономных инверторов с ШИМ-управлением требует дальнейшего развития теоретической базы для расчета, анализа и синтеза преобразовательных устройств различного применения, отвечающих требованиям энергоэффективности.

Принимая во внимание сформулированную автором цель диссертационной работы - повышение энергетической эффективности преобразования электрической энергии автономными инверторами с ШИМ, следует признать, что тема исследования актуальна и своевременна.

Судя по представленным в автореферате результатам, они обладают новизной и имеют как теоретическое, так и практическое значение.

Так, предложенная автором универсальная методика вывода соотношений для действующего значения и коэффициента гармоник входных и выходных переменных автономных инверторов (в том числе и многоуровневых), основанная на том факте, что длительности импульсов указанных переменных изменяются по законам линейных (межфазных) модулирующих сигналов, характеризуется оригинальностью, признаками научной новизны и является развитием методов анализа входной и выходной энергии автономных инверторов.

Предложенные в диссертационной работе концепция о множественности форм представления способов управления инверторами, а также идея формального представления инверторов напряжения и тока как единый класс вентильных

преобразователей, характеризующихся однотипными способами управления и аналитическими выражениями, описывающими входные и выходные переменные, также представляют интерес с точки зрения усиления значимости результатов анализа автономных инверторов и способов их управления и также имеют научную новизну.

К новым результатам диссертации можно отнести предложенный показатель оценки эффективности преобразования электрической энергии автономными инверторами - приведенный интегральный коэффициент гармоник  $q$ -го порядка, определяющий качество входной, выходной энергии вне зависимости от кратности частот модуляции и коммутации.

Новизной обладает и разработанная автором методика синтеза способов ШИМ по заданному критерию оптимальности. Полученные таким образом способы ШИМ обладают как свойствами, присущими оптимальным способам, так и свойствами, присущими классическим способам ШИМ, которые реализуются вертикальными методами.

Практическое значение имеют полученные в диссертации обобщенные аналитические соотношения для действующего значения и коэффициента гармоник входных и выходных переменных инверторов, результаты сравнительного анализа синтезированных способов ШИМ с наиболее распространенными способами ШИМ, синтезированные способы ШИМ, часть из которых защищена патентами РФ, а также алгоритмы и рекомендации по практической реализации данных способов на специализированных для управления устройствами силовой электроники микроконтроллерах, причем как применительно к АИН, так и к АИТ.

Ряд положений диссертационных исследований нашел практическое применение в опытных и промышленных разработках на предприятиях г. Новосибирск, что подтверждено соответствующими актами внедрения.

Уровень проведенных исследований высок, основные результаты диссертации получили широкую апробацию, использовались в ходе реализации федеральных целевых программ, госконтрактов, хоздоговорных работ и нашли отражение в многочисленных публикациях, в том числе в 16 публикациях в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Автореферат написан доступным техническим языком, логично, достаточным образом иллюстрирован и оформлен.

В качестве замечания по автореферату следует отметить следующее.

В диссертации приведены обобщенные соотношения для действующего значения и коэффициента гармоник линейного напряжения, справедливые для  $m$ -фазного  $L$ -уровневого АИН. Но автор не указал, справедливы ли они для всех типов многоуровневых АИН или только для какой-то одной схемы, например, для многоуровневого АИН с фиксирующими диодами.

Синтезированные способы ШИМ автор сравнивал с существующими способами только по выбранным для синтеза критериям оптимальности: ИКГН 1-го порядка и выходу первой гармоники. Было бы интересно выяснить более подробно свойства новых способов, например, как способы влияют на другие характеристики инвертора напряжения: на потери в инверторе, на загрузку вентилях по току, на качество входной энергии и т.д.

Четвертая глава, посвященная указанному выше сравнительному анализу, не содержит никаких рисунков, что снижает восприятие представленной в ней информации.

Отмеченные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы Баховцева И. А. По научной новизне, значимости полученных теоретических и практических результатов, актуальности решаемой проблемы работа соответствует требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор Баховцев Игорь Анатольевич заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.12 – силовая электроника.

Главный конструктор систем преобразования электроэнергии -  
заместитель Главного конструктора АО «АЭРОЭЛЕКТРОМАШ»,  
кандидат технических наук

г. Москва, Б. Новодмитровская,  
8-916-554-20-44  
e-mail: [flat84@mail.ru](mailto:flat84@mail.ru)



С.Ф. Коняхин

Подпись С. Ф. Коняхина заверяю

Корпоративный секретарь

|                                                                                                                |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| акционерное общество<br>«Аэроэлектромаш»                                                                       |
| 127015, г. Москва,<br>Ул. Большая Новодмитровская, д.12 стр.15<br>Тел.: (495)980-65-01<br>Факс: (495)980-65-08 |

С. А. Морозова

## О Т З Ы В

на автореферат диссертации Баховцева Игоря Анатольевича «Анализ и синтез энергооптимальных способов управления инверторами с ШИМ»  
на соискание ученой степени доктора технических наук  
по специальности 05.09.12 - силовая электроника

Диссертационная работа посвящена актуальной теме, связанной с решением научно-технической проблемы повышения энергетической эффективности автономных инверторов напряжения и тока с широтно-импульсной модуляцией, нашедших широкое применение в системах генерирования электроэнергии и электроприводе.

Основными научными результатами диссертационной работы являются: концепция множественности форм представления способов управления АИ и концепция формального рассмотрения инверторов тока и напряжения как единого класса преобразователей, обладающих широким набором общих свойств; единая методика расчета качества электроэнергии инверторов, позволяющая вывести в замкнутом виде соотношения для действующего значения и коэффициента гармоник входных и выходных переменных в общем случае многоуровневых автономных инверторов с ШИМ; обобщенные аналитические соотношения для действующего значения и коэффициента гармоник выходного напряжения  $m$ -фазного  $L$ -уровневого АИН, управляемого различными способами ШИМ; новый показатель оценки эффективности преобразования электрической энергии автономными инверторами - приведенный интегральный коэффициент гармоник напряжения (ИКГН)  $q$ -го порядка, учитывающей качество выходной энергии и коммутационные потери в инверторе; методика синтеза и синтез новых способов ШИМ по заданным критериям.

Диссертационная работа имеет практическую значимость. Разработанная методика, позволяет оценить качество входной и выходной энергии новых топологий автономных инверторов с ШИМ. Результаты обобщенного анализа могут стать основой для технических решений, обеспечивающих повышение энергетической эффективности проектируемых преобразователей. Интерес представляют разработанные способы ШИМ, позволяющие по критериям ИКГН 1-го порядка или степени использования источника питания повысить энергоэффективность автономных инверторов. Практическая ценность диссертации подтверждается внедрением ее результатов во многих научных и производственных организациях: АКБ «Якорь» (г. Москва), ФГУП ПО «СЕВЕР»,

ЗАО «НОЭМА», ОАО «ИПФ», ТОО «СИБИРЬ-МЕХАТРОНИКА» (г. Новосибирск).

К недостаткам можно отнести следующее

1) Не показано влияние синтезированных способов ШИМ на некоторые энергетические характеристики АИ: загрузку ключей по току, статические и динамические потери.

2) Не приведены формы представления (модели), о которых говорилось в первой главе, для синтезированных способов ШИМ, что дополнительно подтвердило бы правомерность предложенной автором концепции.

В целом диссертационная работа выполнена на высоком теоретическом уровне. Получены важные научные и практические результаты. Основные положения диссертации апробированы на высоких по статусу научно-технических конференциях. По теме опубликовано 47 работ, в том числе 16 в изданиях рекомендованных ВАК РФ. Предложенные способы управления автономными инверторами защищены патентами РФ.

Работа соответствует требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям по специальности 05.09.12 - силовая электроника, а ее автор Баховцев Игорь Анатольевич заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук.

Зав. лабораторией

«Силовых электромагнитных  
импульсных систем»

Института горного дела СО РАН,  
д.т.н., академик РАЕН



Б.Ф. Симонов

Подпись Симонова Б.Ф. заверяю  
Ученый секретарь ИГД СО РАН, к.т.н.



А.П.Хмелинин.



## ОТЗЫВ

доктора технических наук, профессора Халютин Сергея Петровича на автореферат диссертации **БАХОВЦЕВА ИГОРЯ АНАТОЛЬЕВИЧА** на тему «Анализ и синтез энергооптимальных способов управления инверторами с ШИМ», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальностям 05.09.12 – силовая электроника.

В настоящее время интенсивно развивается полупроводниковая техника, в том числе появляются мощные силовые полностью управляемые полупроводниковые элементы. Современные транзисторы IGBT и MOSFET, а также запираемые тиристоры GTO и IGCT позволяют кардинально улучшить технические характеристики полупроводниковых преобразователей электрической энергии. Кроме силовых ключей важным элементом, влияющим на совершенствование полупроводниковой техники являются высокопроизводительные микроконтроллеры, реализующие алгоритмы на основе принципов широтно-импульсной модуляции. Учитывая особенности элементной базы и вычислительные возможности микроконтроллеров появляется возможность множественной реализации и необходимость разработки наиболее эффективных способов управления этими устройствами. В работе Баховцева И.А. рассматриваются вопросы повышения энергетической эффективности преобразователя электрической энергии автономными инверторами с ШИМ, что является весьма актуальной проблемой.

В работе получены следующие научные результаты:

- предложена концепция множественности форм представления способов управления автономными инверторами, которая позволяет оценивать характеристики и возможности способа управления;
- предложено автономные инверторы тока и напряжения на основе принципа дуальности 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;
- разработана единая методика расчета качества электроэнергии инверторов, позволяющая вывести аналитические соотношения для действующего значения и коэффициента гармоник входных и выходных переменных.
- получены обобщенные аналитические соотношения для действующего значения и коэффициента гармоник выходного напряжения  $m$ -фазного  $L$ -уровневого автономного инвертора напряжения, управляемого различными способами ШИМ, справедливые и для дуальных переменных автономных инверторов тока;
- сформулирован «принцип подобия способов», позволяющий адекватно, с единых позиций сравнивать способы ШИМ как по входным, так и по выходным характеристикам;
- предложен новый показатель оценки эффективности преобразования электрической энергии автономными инверторами – приведенный интегральный коэффициент гармоник напряжения (ИКГН)  $q$ -го порядка.
- 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;
- предложена методика синтеза и синтезирован ряд новых способов ШИМ по заданным критериям эффективности.

Из недостатков работы можно отметить следующее:

- в автореферате не отражена в явном виде решаемая в работе научная проблема;

- предложенный в качестве критерия эффективности энергетических процессов автономного инвертора напряжения интегральный коэффициент гармоник напряжения (ИКГН) 1-го порядка недостаточно обоснован, и не понятно, как в нём учитываются коммутационные потери инвертора;

- автором поставлена задача выбора критериев оптимальности для синтеза способов управления ШИМ, однако не ясно, являются ли синтезированные новые способы управления оптимальными;

- не ясно, почему автор не использует стандартизованные показатели качества электроэнергии для сравнения предложенных и существующих способов ШИМ, например показатели качества, изложенные в ГОСТ 54073-2010 для авиационных систем электропитания; это затрудняет оценку, представленную автором;

- автором заявлено о применении свойств дуальности между переменными инверторов тока и инверторов напряжения, однако в автореферате это не раскрыто.

Тем не менее, указанные недостатки не снижают общего высокого уровня исследований и ценности полученных в работе результатов.

Судя по автореферату, диссертация Баховцева И.А. представляет собой научно-квалификационную работу, в которой решена научная проблема проектирования энергооптимальных способов управления инверторами с ШИМ, имеющая важное значение для развития российской промышленной электроники, отвечающую требованиям п.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК, утверждённого постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, а соискатель заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.12 – силовая электроника.

Доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой электротехники и авиационного электрооборудования  
ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет гражданской авиации» (МГТУ ГА), 125993 г. Москва, Кронштадтский б-р, д. 20,  
+7 (499) 459-04-37, s.khalutin@mstuca.aero.

Подпись Халютин С.П. удостоверяю,  
проректор по научной работе и инновациям МГТУ ГА,  
доктор технических наук, профессор



С. П. Халютин

В. В. Воробьев

## О Т З Ы В

на автореферат диссертации Баховцева Игоря Анатольевича «Анализ и синтез энергооптимальных способов управления инверторами с ШИМ» на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.12 - силовая электроника

Диссертационная работа Баховцева И.А. посвящена решению актуальной научно-технической проблемы повышения энергетической эффективности преобразования электрической энергии автономными инверторами с ШИМ содержащей:

- обобщенное исследование энергетических характеристик,
- развитие критериев оценки энергоэффективности,
- унификацию управления автономными инверторами в соответствии с принципом дуальности
- синтез эффективных способов управления по заданным энергетическим критериям.

Работа состоит из пяти глав с введением и заключением.

В первой главе рассмотрены топологии автономных инверторов напряжения и тока и эволюция методов ШИМ. Систематизация зарубежных и отечественных сведений по данным темам позволила сделать ряд следующих выводов:

1) Анализ информации о принципе дуальности, характерном для автономных инверторов тока (АИТ) и напряжения (АИН), позволяет формально рассматривать их 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. Этот системный вывод подтвержден в соответствующих разделах диссертации.

2) Анализ последних исследований скалярных и векторных способов ШИМ позволяет сделать заключение о том, 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 по-своему оценить характеристики и возможности способа управления, и которые предложено назвать моделями способов управления.

3) Показано, что если в области силовых схем автономных инверторов (АИ) обобщение выполнено (в виде разработки обобщенных многоуровневых топологий), то в области способов управления, также характеризующихся большим многообразием, такое обобщение отсутствует.

4) Для улучшения состояния в вопросах разработки и анализа способов управления инверторами, актуальными являются систематизация и обобщение информации о способах ШИМ, разработка информационно-емких критериев и

объективных условий сравнения способов, а также развитие методик анализа и синтеза способов управления автономными инверторами.

Анализ, проведенный в первой главе, явился основой для определения цели диссертационной работы и основных задач для ее решения.

К ним автор относит:

1) Разработку 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) Разработку 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.

Во второй главе диссертации проведен обобщенный теоретический анализ энергетических показателей АИН, управляемых современными способами ШИМ. В качестве искоемых энергетических показателей были выбраны действующее значение и коэффициент гармоник его входных и выходных переменных. Автором была предложена единая методика расчета этих показателей, основанная на том, что длительности импульсов входных и выходных переменных АИН (а также и АИТ) на интервалах периода изменяются по законам межфазных, или линейных, модулирующих сигналов. Переход к усредненным значениям на такте позволил получить непрерывные функции изменения длительностей по законам линейных модулирующих сигналов. В совокупности с законом изменения амплитуд переменных на каждом интервале это позволило полностью аналитически описать переменную на каждом интервале и периоде в целом. Такое описание переменных стало основой единой методики вывода выражений для показателей переменных, в частности действующего значения, полезной составляющей и коэффициента гармоник как показателя качества соответствующей энергии. Дальнейший анализ показал, что предложенная методика применима и к входным и выходным переменным многоуровневых инверторов напряжения.

Полученные по предложенной методике аналитические соотношения для разных способов ШИМ и топологий АИН позволили выявить ряд закономерностей (например, принцип подобия способов), которые вылились в возможность формирования обобщенных аналитических выражений, справедливых для фазных напряжений и входных токов АИН для всех рассмотренных способов ШИМ в рамках одной топологии, а для линейных напряжений - для  $m$ -фазного  $L$ -уровневого АИН, управляемого теми же способами ШИМ. Отличия между способами заключается только в рабочем диапазоне обобщенной глубины модуляции.

Единство полученных соотношений обусловило тот вывод, что коэффициент гармоник не может быть критерием сравнительной оценки способов ШИМ. Автором был предложен новый показатель оценки эффективности преобразования электрической энергии автономными инверторами - приведенный интегральный коэффициент гармоник напряжения (ИКГН)  $q$ -го порядка, учитывающей как качество выходной (входной) энергии, так и, косвенным образом, коммутационные потери в инверторе. В частности было показано, что ИКГН 1-го порядка в квадратичной зависимости пропорционален дополнительным потерям в нагрузке от высокочастотных гармоник спектра. Было 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 (ИКГН 1-го порядка, умноженный на число коммутаций в фазе АИН).

Для ряда способов ШИМ и топологий АИН были выведены аналитические соотношения для приведенного ИКГН 1-го, 2-го и 3-го порядка, показана их значимость на примере анализа выходных цепей АИН и АИТ прямыми методами расчета, а также эффективность при сравнительном анализе способов ШИМ.

Также во второй главе продемонстрировано, как полученные для АИН соотношения, на основе принципа дуальности распространить на инверторы тока.

Многие результаты второй главы, несомненно, имеют научную новизну.

*Третья глава* посвящена синтезу энергооптимальных способов ШИМ по заданным критериям с использованием формального и эвристического (неформального) методов. С целью упрощения задачи синтеза формальным методом автор разделил способ ШИМ на три компонента: закон модуляции, алгоритм переключения и процедуру реализации способа, дал им определения и сформулировал методику синтеза каждого компонента. Особенностью предложенной методики синтеза способов ШИМ является то, что она направлена на их реализацию вертикальным методом для улучшения динамических характеристик инвертора (и системы в целом) по сравнению с традиционными оптимальными способами ШИМ.

В совокупности с эвристическим подходом автором был синтезирован ряд новых способов ШИМ однофазным и трехфазным двухуровневым АИН, которые, что было продемонстрировано на имитационных моделях, также могут быть использованы для управления многоуровневыми АИН и инверторами тока. Ряд синтезированных способов защищен патентами РФ.

*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. Сравнение проводилось с использованием компьютерных моделей, разработанных в имитационной среде моделирования *PSIM*. Как показали результаты сравнения, синтезированные способы в ряде случаев (условий использования) превосходят наиболее распространенные современные способы ШИМ, что позволило в целом сформулировать рекомендации по их использованию.

Пятая глава посвящена микропроцессорной реализации синтезированных способов ШИМ в системах управления АИН и АИТ.

Было проанализировано единственное различие, согласно предложенной концепции единства АИН и АИТ, существующее между данными преобразователями, а именно: разная реализация в системе управления 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. Показано, что отличие в работе систем управления инверторами имеет место только на ее заключительном этапе - при синтезе собственно импульсов управления, реализующих текущее состояние конкретного инвертора. Показаны два варианта синтеза импульсов управления на примере трехфазного двухуровневого АИТ, одному из которых (табличному) было отдано предпочтение.

Далее автором приведены 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. Сформулированные рекомендации ориентированы на реализацию на микроконтроллерах класса «Motion Control», специализированных для управления устройствами силовой электроники. Для ряда синтезированных способов ШИМ были приведены осциллограммы физического эксперимента, направленного на верификацию предложенных для их микропроцессорной реализации инженерных подходов и рекомендаций.

Диссертационная работа Баховцева И.А. также обладает признаками практической значимости полученных результатов. Об этом, в частности, говорит следующее: связь диссертационной работы с федеральными программами, грантами и хозяйственными работами, проводимыми на кафедре электроники и электротехники Новосибирского государственного технического университета (НГТУ) с участием автора, а также акты внедрения результатов диссертации при разработке опытных и промышленных изделий на предприятиях г. Новосибирска: ФГУП ПО «СЕВЕР», ЗАО «НОЭМА», ОАО «ИПФ», ТОО «СИБИРЬ-МЕХАТРОНИКА», и в учебном процессе НГТУ.

Автореферат написан понятно, логично, в достаточной степени иллюстрирован. Судя по автореферату, диссертация имеет органическое единство, охватывает комплекс вопросов: анализ существующих способов ШИМ, выбор критериев эффективности, выбор методики и синтез способов ШИМ, рекомендации по их реализации в микропроцессорных системах управления.

При ознакомлении с авторефератом диссертационной работы возник ряд вопросов и замечаний, основные из которых представлены ниже.

1) При описании 2-й главы, посвященной, в частности, анализу современных способов ШИМ, автор не привел ни для одного из них графического представления. Причем в тексте способы обозначены с использованием русскоязычной аббревиатуры, хотя большинство из них имеют зарубежное

«происхождение». Так как нет связи с общепринятым обозначением способов ШИМ, восприятие результатов анализа (например, на стр. 20) несколько затруднено.

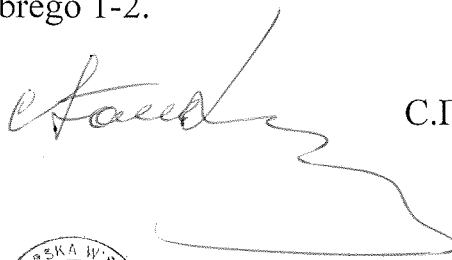
2) Полученные обобщенные формулы для показателей линейного напряжения  $m$ -фазного  $L$ -уровневого АИН автор распространил на все типы инверторов. Если применительно к многоуровневым инверторам с фиксирующими диодами и инверторам с фиксирующими конденсаторами с этим можно согласиться, то применение формул к каскадным многоуровневым инверторам на Н-мостах требует своего подтверждения.

3) Проведенный в 4-й главе сравнительный анализ пяти, судя по автореферату, синтезированных и ряда современных способов ШИМ должен составлять существенный объем диссертации. Однако в автореферате этому моменту уделено мало внимания (текста) и он совсем не иллюстрирован, что позволило бы полнее оценить синтезированные способы ШИМ.

В диссертационной работе Баховцева И.А. разработан единый, комплексный подход к исследованию проблемы повышения энергоэффективности автономных инверторов с ШИМ. По объему проведенных исследований, научной новизне и практической значимости работа представляет собой решение научно-технической проблемы, зафиксированной в цели диссертации. Диссертационная работа Баховцева И.А. «Анализ и синтез энергооптимальных способов управления автономными инверторами с ШИМ» вполне удовлетворяет требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор Баховцев Игорь Анатольевич заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.12 – «Силовая электроника».

Profesor Instytut Elektrotechniki  
i Automatyki Okrętowej. Akademia Morska.  
70-500 Szczecin. Wały Chrobrego 1-2.

д.т.н., проф.



С.Г. Герман-Галкин

Akademia Morska w Szczecinie  
Wydział Mechaniczny  
70-500 Szczecin, ul. Wały Chrobrego 1-2  
tel. (91) 4809 512, fax (91) 4809 380  
e-mail: dm@am.szczecin.pl



## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Баховцева Игоря Анатольевича  
«Анализ и синтез энергооптимальных способов управления инверторами  
с ШИМ» на соискание ученой степени доктора технических наук  
по специальности 05.09.12 - силовая электроника

Проблема энергосбережения, приобретающая все большую остроту в современном мире, может решаться разными подходами. Одним из таких подходов является повышение эффективности преобразования электроэнергии устройствами силовой электроники за счет освоения новых многоуровневых и многофазных топологий преобразователей и использования новых энергоэффективных способов управления. В этой связи диссертация Баховцева И.А. на тему «Анализ и синтез энергооптимальных способов управления инверторами с ШИМ», несомненно, является актуальной.

Сформулированные в диссертационной работе задачи сопряжены с реализацией целого ряда научно-технических решений, результаты которых представлены в виде подробного обзора способов ШИМ; разработанной методики анализа качества входной и выходной энергии; в выведенных обобщенных аналитических соотношениях, позволяющих системно рассматривать способы управления инверторами и целенаправленно разрабатывать новые способы ШИМ; в предложенном новом показателе, позволяющем оценить эффективность преобразования электроэнергии автономным инвертором, управляемым тем или иным способом ШИМ; в методике и результатах синтеза по заданному критерию способов ШИМ и в подходах и рекомендациях их реализации в микропроцессорных системах управления.

Полученные результаты нашли свое отражение в 47 опубликованных автором работ, среди которых 16 работ - в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, а также одно авторское свидетельство и 6 патентов РФ. Следует отметить, что результаты диссертационной работы Баховцева И.А. нашли практическое применение, о чем свидетельствует приведенный перечень изделий и промышленных предприятий.

Представленный автореферат хорошо оформлен, написан логично, понятным техническим языком.

По представленному автореферату имеется ряд замечаний, а именно:

1) Слабо графически иллюстрирован вывод обобщенных соотношений для действующего значения и коэффициента гармоник выходного напряжения много-

уровневых инверторов напряжения. Поэтому непонятен смысл некоторых специфических терминов, например, « $\vartheta_i$  – момент перехода с  $(i+1)$ -го уровня на  $(i+2)$ -й уровень;  $m_i$  – число фаз, меньше которого возможно появление  $(i+2)$ -го уровня».

2) Не указаны реальные условия, при которых может быть использована предложенная универсальная методика оценки качества входной и выходной энергии автономных инверторов различных топологий.

3) Приведены результаты расчета прямыми методами показателей качества энергии только в выходных цепях автономных инверторов. Подобный расчет входных цепей автономных инверторов отсутствует, что не обеспечивает полноты анализа преобразователей.

#### Заключение.

В целом, судя по автореферату, результаты, полученные в диссертационной работе Баховцева Игоря Анатольевича, можно классифицировать как решение крупной научно-технической проблемы по улучшению энергоэффективности автономных инверторов напряжения и тока с ШИМ. Работа соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям по специальности 05.09.12 – силовая электроника, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.12 – Силовая электроника.

Профессор кафедры Электроэнергетических  
систем и электротехники Сибирского  
государственного университета водного  
транспорта, доктор технических наук

Горелов В.П.

## О Т З Ы В

на автореферат диссертации Баховцева Игоря Анатольевича  
«Анализ и синтез энергооптимальных способов управления  
инверторами с ШИМ»  
на соискание ученой степени доктора технических наук  
по специальности 05.09.12 - силовая электроника

Освоение электронной промышленностью мощных силовых транзисторов (IGBT, MOSFET) и запираемых тиристоров (GTO, IGCT) явилось толчком к дальнейшему развитию схмотехники полупроводниковых преобразователей и к широкому использованию метода широтно-импульсной модуляции (ШИМ) как основного принципа управления. Последние десятилетия характеризуются возрастающим интересом промышленности к применению в электроприводе и в энергетике многоуровневых полупроводниковых преобразователей частоты, основанных, прежде всего, на автономных инверторах напряжения (АИН) и тока (АИТ), что обусловлено известными их достоинствами.

Однако разработка и эксплуатация новых схем многоуровневых автономных инверторов с ШИМ требует в то же время дальнейшего развития теоретической базы для расчета, анализа и синтеза преобразователей для различных применений, отвечающих требованиям повышенного уровня преобразуемой мощности и энергоэффективности.

Принимая во внимание сформулированную автором цель представленной диссертационной работы - повышение энергетической эффективности преобразования электрической энергии автономными инверторами с ШИМ - следует признать, что тема исследования, безусловно, актуальна.

Судя по представленным в автореферате результатам, они обладают новизной и имеют теоретическое и практическое значение.

К результатам, обладающими признаками новизны, можно отнести:

1) Универсальную методику вывода соотношений для действующего значения и коэффициента гармоник входных и выходных переменных автономных инверторов (в том числе и многоуровневых), основанную на том факте, что длительности импульсов указанных переменных изменяются по законам линейных (межфазных) модулирующих сигналов. Данная методика является развитием методов анализа входной и выходной энергии автономных инверторов и, что тоже ценно, позволяет получать выражения в замкнутом виде.

2) Концепция о множественности форм представления способов управления инверторами, а также идея формального представления инверторов напряже-

ния и тока как единого класса полупроводниковых преобразователей, характеризующихся однотипными способами управления и аналитическими выражениями, описывающими входные и выходные переменные. Концепция также представляют интерес с точки зрения усиления значимости результатов анализа автономных инверторов и способов их управления.

3) Предложенный показатель оценки эффективности преобразования электрической энергии автономными инверторами - приведенный интегральный коэффициент гармоник  $q$ -го порядка, определяющий качество входной, выходной энергии безотносительно к кратности частот модуляции и коммутации.

4) Разработанная автором методика синтеза способов ШИМ по заданному критерию оптимальности. Полученные таким образом способы ШИМ обладают свойствами, присущими как оптимальным способам, так и классическим способам ШИМ, реализуемым вертикальными методами.

Практическое значение имеют полученные в диссертации обобщенные аналитические соотношения для действующего значения и коэффициента гармоник входных и выходных переменных инверторов, результаты сравнительного анализа синтезированных способов ШИМ с наиболее распространенными способами ШИМ, синтезированные способы ШИМ, часть из которых защищена патентами РФ, а также алгоритмы и рекомендации по практической реализации данных способов на специализированных для управления устройствами силовой электроники микроконтроллерах, причем как применительно к АИН, так и к АИТ.

Ряд положений диссертационных исследований нашли практическое применение в опытных и промышленных разработках на предприятиях г. Новосибирска, таких как что подтверждено соответствующими актами внедрения.

Судя по автореферату уровень проведенных исследований достаточно высок, основные результаты диссертации получили широкую апробацию, использовались в ходе реализации федеральных целевых программ, госконтрактов, хозяйственных работ по заказам таких предприятий как «Якорь» (г. Москва), ФГУП ПО «СЕВЕР», ЗАО «НОЭМА», ОАО «ИПФ», ТОО «СИБИРЬ-МЕХАТРОНИКА» (г. Новосибирск), а также в учебном процессе в учебных курсах «Электромагнитная совместимость устройств силовой электроники» и «Микропроцессорные системы силовой электроники». Результаты диссертационных исследований нашли свое отражение в 47 печатных работах, в том числе в 16 публикациях в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Автореферат в общем и целом написан понятно, логично, достаточно хорошо иллюстрирован и оформлен.

В качестве замечаний по автореферату следует отметить следующее.

1. При выборе критерия эффективности для сравнительного анализа и синтеза новых способов ШИМ (приведенного ИКГН 1-го порядка) автор представил только его содержание, но не сравнил его по значимости, глубине оценки с другими аналогичными используемыми при анализе и синтезе критериями.

2. В автореферате довольно часто используются нетрадиционные сокращения (СПУ, ЗМ, АП, ПРС, СШИМ+З, СШИМ+Δ, СШИМ<sub>C1...C5</sub>), которые несколько затрудняют восприятие информации.

Также имеются ряд недостатков в оформлении графиков и таблиц.

Отмеченные замечания не уменьшают общей положительной оценки диссертационной работы Баховцева И.А. По научной новизне, значимости полученных теоретических и практических результатов, актуальности решаемой проблемы работа удовлетворяет критериям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», а ее автор Баховцев Игорь Анатольевич заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.12 – силовая электроника.

Зав. кафедрой «Электротехнические  
комплексы и материалы» Национального  
исследовательского Томского  
политехнического университета,  
доктор технических наук, профессор

А.Г. Гарганеев

Подпись Гарганеева Александра Георгиевича заверяю

Ученый секретарь НИИ ТПУ

«30» ноября 2017 г.

О.А. Ананьева



Национальный исследовательский Томский  
Политехнический университет  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

E-mail: [tpbalex13@tpu.ru](mailto:tpbalex13@tpu.ru)

Телефон: 8-3822-563787