

## **О Т З Ы В**

официального оппонента Томашевского Юрия Болеславовича  
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

### ***Актуальность темы диссертационного исследования***

Повышение энергетической эффективности полупроводниковых преобразователей (ПП) является неотъемлемым условием развития и роста конкурентоспособности отечественного электрооборудования, в котором нашли широкое применение автономные инверторы напряжения (АИН) и тока (АИТ). Перспективным направлением решения этой важной проблемы является использование в схемах рассматриваемого класса многоуровневых и многофазных топологий, с одной стороны, основанных на применении недорогих полупроводниковых приборов с пониженным классом по напряжению (для АИН) и номинальным значением тока (для АИТ), а, с другой стороны, дающих возможности синтеза качественных кривых тока и напряжения за счет дополнительных уровней и средств широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Это обеспечивает рост показателей качества входной и выходной энергии, уменьшение потерь в автономных инверторах и, как следствие, повышение КПД преобразовательной системы в целом. Характеризуя современный научный уровень в области анализа и синтеза процессов преобразования электроэнергии в устройствах силовой электроники данного класса, можно констатировать, что разработанные методы расчета и алгоритмы управления, как правило, имеют целый ряд недостатков, ограничивающих их широкое применение. Более того, вопрос синтеза способов управления АИН и АИТ с ШИМ до настоящего времени окончательно не решен, и исследования в области синтеза новых энергоэффективных способов ШИМ требуют дополнительной как теоретической, так и экспериментальной проработки. На этом основании считаю, что тема диссертационной работы Баховцева И.А., посвященная повышению энергетической эффективности автономных инверторов напряжения и тока, является актуальной и полностью соответствует требованиям, предъявляемым к темам диссертационных исследований на соискание ученой степени доктора технических наук.

### ***Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации***

Автором проведен подробный и полный анализ достижений в области повышения энергетической эффективности преобразования электрической энергии автономными инверторами, что позволило ему в дальнейшем развить методы анализа и аналитического обобщенного исследования энергетических характеристик, определить критерии оценки их энергоэффективности и на этой основе синтезировать эффективные способы управления автономных инверторов с ШИМ.

В ходе диссертационного исследования получен ряд результатов, имеющих научную новизну. Наиболее важными из них являются:

1. 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, основанная на свойстве импульсов всех входных и выходных переменных модулироваться по длительности в соответствии с виртуальным «линейным модулирующим сигналом».

2. Полученные по предложенной методике обобщенные аналитические соотношения для действующего значения и коэффициента гармоник выходного напряжения  $m$ -фазного  $L$ -уровневого АИН, управляемого различными способами ШИМ, справедливы и для дуальных переменных АИТ.

3. 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 коммутационные потери в инверторе. Получены аналитические и аппроксимирующие выражения соответственно для приведенного ИКГН 1-го порядка и для приведенных ИКГН 2-го и 3-го порядков для большинства современных способов ШИМ двух- и трехуровневых АИН.

4. Методика формального синтеза и синтезированные на ее основе новые способы ШИМ по критерию минимума ИКГН 1-го порядка, а также способы ШИМ, расширяющие линейный диапазон регулирования 1-й гармоники выходного напряжения вплоть до 180-градусного управления. Указанные способы ШИМ защищены патентами РФ.

Положения, выносимые на защиту, обладают научной новизной и обеспечивают полное представление о проведенных автором в рамках диссертационной работы исследованиях и полученных результатах.

Значимыми для науки являются предложенные концепция множественности форм представления способов ШИМ и принцип подобия способов, а также результаты проведенного теоретического исследования. В совокупности они расширяют наши представления о способах ШИМ, об их общности и фактическом отличии, что подтверждено математически. Сформулированные концепции и принципы, выведенные обобщенные соотношения для показателей качества электроэнергии автономных инверторов, а также соотношения для приведенных интегральных коэффициентов, несомненно, являются вкладом в развитие теории ШИМ в силовой электронике.

Интересной также является предложенная методика анализа энергетических характеристик АИТ, основанная на использовании принципа дуальности и результатов, полученных для АИН, которая была продемонстрирована в диссертационной работе. Такой подход позволит ускорить процесс анализа и проектирования инверторов тока с ШИМ и имеет методологический и практический аспект.

Обоснованность выводов и рекомендаций однозначно определяется тем, что разработанные методики расчета показателей качества входной и выходной

энергии позволили осуществить синтез по заданным критериям оптимальности способов ШИМ и осуществить их микропроцессорную реализацию.

Следует отметить, что результаты диссертации внедрены в ООО «Сибирь-Мехатроника» при разработке станций частотного управления насосными агрегатами мощностью 250-1000 кВт серии ВСЧ500-ДТС с преобразователями частоты промежуточного звена серии СЧ500.

С учетом вышеизложенного считаю необходимым отметить, что обоснованность научных положений, рекомендаций и выводов, представленных в диссертационной работе Баховцева И.А., не вызывает сомнений.

### *Достоверность и новизна научных положений, выводов и рекомендаций*

Достоверность полученных результатов и выводов подтверждена строгостью и последовательностью проведенного математического анализа, обоснованностью предварительных допущений, компьютерным моделированием, а также вычислительными экспериментами и практическим применением результатов диссертационной работы, что отражено в актах внедрения.

Например, адекватность модели способа управления подтверждается множественностью форм представления способов ШИМ, когда каждая модель позволяет оценить характеристики и/или возможности способа управления с соответствующими позиций.

Новизна научных положений, выводов и рекомендаций диссертационной работы Баховцева И.А. не вызывает сомнений, так как их органичное сочетание способствует выбору наиболее перспективных направлений исследования с точки зрения анализа и синтеза способов ШИМ в автономных инверторах тока и напряжения и определяет существенный вклад в теорию ШИМ применительно к устройствам силовой электроники.

### *Оценка содержания диссертации, ее завершенности*

Диссертационная работа изложена логически грамотно, автор обосновывает все теоретические выкладки и подтверждает полученные результаты модельными экспериментами и расчетными примерами. Автореферат полностью соответствует диссертационной работе. Теоретические и прикладные результаты диссертации опубликованы в 47 печатных работах, в том числе 16 работ опубликованы в ведущих рецензируемых журналах и изданиях, рекомендуемых Высшей аттестационной комиссией РФ. По материалам диссертации получены 6 патентов РФ и одно авторское свидетельство СССР.

Диссертационная работа Баховцева И.А. выполнена на 248 страницах машинописного текста и содержит введение, пять глав, заключение, список литературы из 310 наименований, 140 рисунков, 46 таблиц и шесть приложений.

Тема диссертации тесно увязана с рядом Федеральных научно-технических программ и Государственных контрактов на выполнения исследовательских работ, выполняемых на кафедре электроники и электротехники Новосибирского государственного технического университета (НГТУ). Результаты

диссертации обсуждались на многочисленных международных, межрегиональных и других научных конференциях по силовой электронике и электроприводу.

Работа содержит все необходимые элементы законченной научной работы: обоснование актуальности темы на основании анализа литературы; выбор инструментов теоретического и экспериментального исследования; определение концепции множественности форм представления (моделей) способов управления автономными инверторами с ШИМ; разработка математической модели, позволяющей единообразно описать форму и энергетические характеристики всех входных и выходных переменных автономных инверторов; описание обобщенных аналитических соотношений для показателей качества выходного напряжения  $m$ -фазного  $L$ -уровневого автономного инвертора напряжения для различных способов ШИМ; новый показатель оценки эффективности преобразования электрической энергии автономными инверторами - приведенный интегральный коэффициент гармоник напряжения  $q$ -го порядка; синтезированные по заданным критериям эффективности способы ШИМ и их микропроцессорные реализации.

Полученные Баховцевым И.А. в результате исследований методики, способы и рекомендации следует применять на предприятиях электротехнической промышленности, ориентированных на разработку и выпуск статических преобразователей и электроприводов на их основе, а также в вузах соответствующего профиля для подготовки специалистов в области силовой электроники, преобразовательной техники и мехатронных систем.

Все это позволяет сделать вывод о завершенности данной работы.

В качестве дальнейшего направления исследований автору можно рекомендовать развивать предложенный подход к анализу качества входной и выходной энергии автономных инверторов для других типов преобразователей, например, для матричных преобразователей с ШИМ. Предложенную методику синтеза способов ШИМ, использованную в диссертации для двухуровневых АИН, целесообразно расширить и на многоуровневые топологии.

### ***Замечания по диссертационной работе***

1. В формулировке цели диссертационного исследования автор в качестве одной из основ ее достижения отмечает «развитие критериев оценки» преобразования электрической энергии автономными инверторами с ШИМ. Непонятно, что понимается под термином «развитие»? Это введение новых или изменение уже известных критериев? Сводится ли все к однокритериальной задаче или это многокритериальная оптимизация?

2. Выбрав в качестве критерия энергоэффективности преобразования электроэнергии и формального синтеза способов ШИМ приведенный интегральный коэффициент 1-го порядка, автор не произвел его сравнения с другими существующими критериями подобного рода, что позволило бы оценить степень значимости выбранного показателя эффективности и его согласованности с этими критериями.

3. Приведенные в таблице 2.7 (стр. 164) обобщенные формулы для действующего значения и коэффициента гармоник линейного напряжения  $L$ -уровневого и  $m$ -фазного АИН с ШИМ довольно громоздки, содержат много разных параметров и будут вызывать трудности при практическом использовании в инженерной практике. В этой связи было бы целесообразно дополнить данную таблицу методикой или примером, которые бы продемонстрировали процедуру перехода от обобщенных формул к конкретным, соответствующим определенной топологии и способу управления.

4. Автор в качестве инструмента расчетов при анализе и синтезе энергооптимальных способов управления инверторами с ШИМ упоминает целый спектр пакетов: Matlab, Mathcad, PSIM, Excel. В тексте диссертации отсутствует обоснование такого выбора. Целесообразным видится выбор такой среды, как Matlab+Simulink, заметно повышающей эффективность вычислений.

5. В приложении В для синтезированных способов ШИМ автор привел имитационные модели в программной среде PSIM, позволяющие, в частности, оценить качество выходной энергии по ИКГН 1-го порядка. При этом, во-первых, отсутствует оценка точности моделей, а, во-вторых, не оценена адекватность разработанного автором «инструмента» измерения данного показателя и не приведены характеристики входящих в него стандартных блоков, что может быть необходимым для повторения и сопоставления результатов компьютерного эксперимента.

6. Выполнив формальный синтез ряда способов ШИМ, автор сравнил их не с аналогичными по классу («оптимальными») способами, а со способами, получившими наибольшее распространение в управлении инверторами, что не дает возможности в полной мере оценить эффективность разработанных способов.

7. При оформлении текста и графического материала автор допустил ряд неточностей. По тексту диссертации: использование сочетание слов «наиболее оптимальное» (с.18, с.112, с.184) следует признать не совсем корректным; символом  $L$  обозначаются два параметра – количество уровней автономных инверторов (с.3, с.7, с.21-23, с.32, с.34-35, с. 39-40, с.52, ..., с.373) и индуктивность нагрузки (с.178-179); в тексте делаются ссылки на приложение 3 (с.248, с.253, с.270, с.278, с.281, с.285, с.288, с.291, с.297, с.300, с.304), хотя в тексте оно обозначено как В. По графике: блок-схема алгоритма синтеза способа ШИМ, представленная на рисунке 3.2 (с.208), не имеет начальной и конечной вершин; на рисунке 5 автореферата не приведены значения глубины модуляции для кривых 1-6.

### ***Заключение по диссертационной работе***

Отмеченные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы Баховцева И.А., которая в целом представляет собой за конченную научно-квалификационную работу, отражающую результаты многолетних исследований автора по развитию теории анализа процессов преобразования и синтеза алгоритмов управления в устройствах силовой электроники.

Совокупность разработанных автором теоретических положений можно квалифицировать как решение крупной научной проблемы повышения энергетической эффективности автономных инверторов с ШИМ, имеющей в силу их широкого распространения важное хозяйственное значение.

Тематика диссертационной работы связана с работами, выполняемыми автором в рамках федеральных целевых программ, государственных контрактов, а также хоздоговорных научно-исследовательских работ.

Результаты, полученные в диссертации, базируются на большом количестве математических выкладок, расчетов и достаточно широко представлены в научных публикациях. Работа прошла апробацию на многих зарубежных и российских конференциях. В автореферате изложены все основные положения и результаты диссертационного исследования.

Представленная диссертационная работа по уровню научной новизны, значимости полученных теоретических и практических результатов, актуальности решаемых задач отвечает критериям «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.

Официальный оппонент,  
доктор технических наук, профессор

Томашевский Ю.Б.

Томашевский Юрий Болеславович,  
Почтовый адрес: 410054 г.Саратов, ул. Политехническая, 77.  
Контактный телефон: (8452) 99-88-43.

Адрес электронной почты: yurytomash@mail.ru

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»,  
заведующий кафедрой «Системотехника»

24.11.2017

Подпись Томашевского Ю.Б.

«заверяю»

Ученый секретарь ученого совета  
Саратовского государственного технического  
университета имени Гагарина Ю.А.



Н.А. Малова