

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

SIBIRIAN  
FEDERAL  
UNIVERSITY



СИБИРСКИЙ  
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

660041, Россия, Красноярск, проспект Свободный, 79  
телефон (391) 244-82-13, факс (391) 244-86-25  
http://www.sfu-kras.ru e-mail: office@sfu-kras.ru

№ \_\_\_\_\_  
на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

«УТВЕРЖДАЮ»



директора ФГАОУ ВО  
Сибирский федеральный

д.т.н., профессор

Колмаков Владимир Иннокентьевич

*В. Колмаков*  
« 16 » ноября 2017 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации 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 исследований

Автономные инверторы (АИ) напряжения и тока широко используются в промышленности, в частности в регулируемом электроприводе, системах накопления электроэнергии, ветроэнергетике, фотовольтаике и т.д. Ужесточение современных требований к полупроводниковым преобразователям с точки зрения энергоэффективности и увеличения уровня преобразуемой мощности требует постоянного совершенствования АИ. Это выражается, во-первых, в разработке многоуровневых и многофазных топологий, позволяющих повысить уровень мощности, отдаваемый в нагрузку (причем, в этом процессе широко используется характерный для АИ тока и напряжения принцип дуальности), а, во-вторых, в разработке новых способов широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

Способы управления автономными инверторами в значительной степени влияют на их энергоэффективность, определяя качество входной, выходной энергии и степень использования источника питания. Разработка тем или иным путем способов ШИМ настоятельно требует систематизации и обобщения информации об уже существующих способах, в частности об их влиянии на выходные и входные энергетические характеристики АИ. Это обусловлено тем, что необходимым этапом

оценки эффективности синтезированных способов ШИМ является их сравнение по энергетическим характеристикам с наиболее широко используемыми способами.

Исследованию автономных инверторов напряжения и тока с ШИМ посвящено большое количество отечественных и зарубежных научных работ. Однако есть все основания полагать, что имеющаяся теоретическая база в части методов анализа энергетических характеристик и процессов преобразования и управления в рассматриваемых инверторах, например с точки зрения принципа дуальности, а также в части синтеза энергооптимальных способов ШИМ, далеко не исчерпана и требует дальнейших исследований. На этом основании считаем, что тема диссертационной работы Баховцева Игоря Анатольевича, посвященной повышению энергетической эффективности преобразования электроэнергии 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, является актуальной.

### **Новизна основных результатов и выводов**

Защищаемые автором результаты обладают научной новизной и практической значимостью. Наиболее важными из них являются:

1. 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.
2. Выведены обобщенные аналитические соотношения для действующего значения и коэффициента гармоник выходного напряжения  $m$ -фазного  $L$ -уровневого АИ напряжения (АИН), управляемого различными способами ШИМ, справедливые и для дуальных переменных АИ тока (АИТ).
3. Предложен новый показатель эффективности преобразования электрической энергии автономными инверторами - приведенный интегральный коэффициент гармоник напряжения (ИКГН)  $q$ -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.
4. 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.

5. Предложена методика синтеза и синтезирован ряд новых способов ШИМ по заданным критериям энергетической эффективности, защищенных патентами РФ.

#### **Степень обоснования и достоверность основных результатов и выводов**

Принятые методы теоретических исследований научно обоснованы. Достоверность полученных результатов и выводов подтверждается корректностью проведенных математических выкладок, обоснованными допущениями, сделанными при исследовании, а также сопоставлением результатов, полученных теоретически и имитационным моделированием.

#### **Значимость для науки и производства**

Предложенная автором универсальная методика, основанная на факте модуляции длительностей импульсов входных и выходных переменных автономных инвертором линейным (межфазным) модулирующим сигналом, является развитием теоретических подходов к анализу качества входной и выходной энергии данных преобразователей. Полученные результаты анализа, их обобщение, обозначенные условия сравнительного анализа в комплексе с предложенным показателем оценки эффективности преобразования электрической энергии способствуют решению задач по улучшению энергетической эффективности автономных инверторов с ШИМ.

Разработанные автором подходы и методики к синтезу новых энергоэффективных по тому или иному критерию способов ШИМ демонстрируют новые возможные пути, позволяющие исключить недостатки, присущие существующим оптимальным способам ШИМ с точки зрения динамики в процессе регулирования в замкнутых системах и, соответственно, расширить их эффективность и область применения.

Ценность работы для производства и промышленности заключается в разработанных методиках расчета энергетических показателей входной и выходной энергии автономных инверторов, сравнительного экспресс-анализа способов ШИМ, в синтезированных способах управления, ориентированных на применение в автономных инверторах и повышение их энергоэффективности. Применение разработанных положений позволяет определить оптимальные способы ШИМ для заданных условий, рациональные значения параметров управления, в том числе микропроцессорного, что в совокупности будет определять эффективность разрабатываемых автономных инверторов.

Полученные Баховцевым И.А. в процессе исследований результаты целесообразно использовать в научно-производственных предприятиях, ориентированных на разработку и выпуск электротехнического оборудования с

применением статических преобразователей энергии с микропроцессорным управлением, например в ФГУП ПО «СЕВЕР», ЗАО «НОЭМА», ОАО «ИПФ», ТОО «СИБИРЬ-МЕХАТРО-НИКА» (г. Новосибирск). Рекомендуется использовать результаты диссертационного исследования в учебном процессе Новосибирского государственного технического университета и других вузах страны, где осуществляется подготовка специалистов в области силовой электроники.

### **Общие замечания**

1. КПД преобразователя оценивается через частоту коммутации, что позволяет лишь косвенно сравнить способы ШИМ по данному показателю энергетической эффективности.

2. В работе довольно сжато рассмотрен вопрос конкретного применения синтезированных способов ШИМ и «энергетического» эффекта, который возможен от их использования.

3. Предложенная методика сравнительного анализа способов ШИМ справедлива только в квазистационарных режимах и поэтому не позволяет их оценить в динамических режимах, которые к тому же зависят еще от параметров контура регулирования.

4. Показав неполноту, по его мнению, существующих классификаций способов ШИМ, автор в то же время разработал свою классификацию, но не представил ее в диссертационной работе в графическом виде.

5. В работе не указаны условия (или границы) возможного применения разработанной автором методики анализа действующих значений и коэффициента гармоник входных и выходных переменных автономных инверторов с ШИМ.

Отмеченные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы Баховцева И.А.

### **Заключение**

Диссертация Баховцева Игоря Анатольевича представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных автором исследований решена научно-техническая проблема повышения энергетической эффективности автономных инверторов напряжения и тока с ШИМ, имеющая важное хозяйственное значение.

Автореферат полностью отражает основные положения и результаты, представленные в диссертации.

Диссертация отвечает критериям, предъявляемым к докторским диссертациям в 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.

Отзыв на диссертацию и автореферат рассмотрен и одобрен на расширенном научном семинаре кафедры «Системы автоматики, автоматизированное управление и проектирование» ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» 15 ноября 2017 г. Протокол № 2.

Отзыв составил:

профессор каф. «Системы автоматики,  
автоматизированное управление

и проектирование»,

проф., д-р техн. наук, \_\_\_\_\_



Краснобаев Юрий Вадимович

15 ноября 2017 г.

Адрес: 660074, г. Красноярск, ул. акад. Киренского, д. 26 А.

Телефон: 8 (391) 291-22-35,

e-mail: [uvkras@mail.ru](mailto:uvkras@mail.ru)