

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе  
Федерального государственного  
бюджетного образовательного  
учреждения высшего образования  
«Национальный исследовательский  
университет «МЭИ»  
доктор технических наук, профессор

В.К. Драгунов

2018 г.



### ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Ле Дык Тиеп «Инверторы в режиме векторной широтно-импульсной модуляции для управления асинхронными двигателями» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

#### **Актуальность для науки и практики**

Современный уровень развития силовых полупроводниковых преобразователей электроэнергии (ППЭ) характеризуется широким внедрением микропроцессорного управления, способствующего повышению эффективности электротехнических комплексов и систем.

С появлением быстродействующих цифровых микроконтроллеров при управлении ППЭ наземных промышленных объектов стала широко применяться векторная широтно-импульсная модуляция (ШИМ), которая по ряду характеристик таких, как качество выходного напряжения, рабочая частота коммутации ключей силового каскада инвертора, степень использования источника питания, линейность регулировочных характеристик параметров выходного напряжения (действующее значение и частота), массогабаритные и энергетические показатели, превосходят инверторы со скалярной ШИМ.

Однако в энергетических бортовых системах летательных аппаратов векторная ШИМ пока еще не применяется столь широко, как в промышленности. Применение векторной ШИМ в преобразователях для авиационного оборудования имеет ряд особенностей. Повышенная частота (400 Гц) основной гармоники формируемого напряжения, что предъявляет более высокие требования к вычислительной мощности управляющего микроконтроллера. Относительно большие индуктивности рассеяния, требуют коррекции формируемых векторов при регулировании скорости

двигателя. Меньшие моменты инерции авиационных АД и большая чувствительность к нестабильности параметров выходного напряжения ППЭ увеличивает пульсации скорости и момента. Таким образом, работа, посвященная поиску, исследованию и применению алгоритмов векторной ШИМ с учетом особенностей использования в авиационных системах и комплексах, является актуальной и имеет практическую ценность.

Диссертационная работа Ле Дык Тиеп посвящена исследованию свойств и выявлению особенностей управления инвертором, нагруженным авиационным трехфазным двигателем, на основе векторной ШИМ и разработке эффективных алгоритмов векторной ШИМ, уменьшающих отклонение частоты вращения и пульсации момента двигателя при его регулировании, актуальна и имеет практическое значение.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, введения, 6 глав, заключения, списка литературы, списка иллюстративного материала и приложений. Работа изложена на 175 страницах текста, содержит 125 рисунков.

**Научная новизна** результатов диссертации заключается в следующем:

– На основе сравнительного анализа скалярной и векторной ШИМ выявлены общие особенности формирования выходного напряжения с учетом алгоритма переходов безопасных состояний инвертора.

– На основе анализа состояний инвертора с помощью карт Карно выявлены состояния, обеспечивающие безопасные переходы при формировании выходного напряжения инвертора, которые предложено использовать как дополнительные векторы в общем алгоритме формирования векторов.

– На основе использования базовых и дополнительных векторов предложены алгоритмы, позволяющие в едином алгоритме формировать выходное напряжение инвертора и исключать сквозные токи первого рода.

– На основе анализа перехода векторов из сектора в сектор при формировании напряжения обоснована последовательность переходов состояний, обеспечивающая равномерное перемещение векторов.

– Получены аналитические выражения функций пересчета, позволяющие реализовать траектории движения формируемых векторов на основе известных траекторий нормированных векторов.

### **Практическая значимость результатов работы**

– На основе универсального алгоритма формирования выходного напряжения, обеспечивающего устранение сквозных токов, предложены способы реализации схемы управления инвертором.

– Разработаны алгоритмы формирования векторов напряжения по заданной траектории, позволяющие снизить потери в силовой части инвертора за счет уменьшения числа переключений силовых ключей ППЭ при формировании векторов напряжения.

– Рассмотрены различные варианты формирования параметров векторов, разработаны соответствующие им алгоритмы и даны рекомендации по их применению в зависимости от вычислительной мощности микропроцессора.

– Предложены схемотехнические решения инвертора в режиме векторной ШИМ, позволяющие на макетном образце подтвердить предложенные решения.

Таким образом, практическую ценность диссертационной работы представляют разработанный автором алгоритм управления силовыми ключами трехфазного инвертора, а также имитационная компьютерная модель, для исследования процессов инвертора. В диссертационной работе решена научно-техническая задача по разработке эффективных алгоритмов реализации векторной ШИМ, позволяющих уменьшить отклонения скорости и пульсации момента асинхронного двигателя для авиационных электротехнических систем и комплексов при его регулировании. Работоспособность предложенного алгоритма подтверждена путем сопоставления результатов, полученных в ходе компьютерного моделирования и экспериментальных исследований на макетном образце разработанной системы управления инвертором в режиме векторной ШИМ нагруженным трехфазным авиационным АД.

#### **Рекомендации по практическому использованию результатов и выводов диссертационной работы**

Результаты диссертационной работы могут быть использованы при проектировании схем управления трехфазным инвертором для управления электродвигателями в авиационных системах и промышленности, системах с использованием альтернативных источников энергии, а также в качестве учебных материалов для студентов электротехнических специальностей.

По оформлению и содержанию работы имеются следующие замечания:

- сопоставительная оценка известных способов регулирования не содержит 3 – сегментные, двухстоечные и комбинированные способы векторной ШИМ;
- при анализе процессов с использованием дополнительных векторов не учитывается тот факт, что при индуктивном характере нагрузки фаза с двумя выключенными транзисторами будет подключена к одной из шин питания из-за протекания тока через диод;
- в работе отсутствует упоминание о различиях при формировании четного и нечетного векторов при использовании вариантов ШИМ № 4 и 5;
- не ясно на каком основании следует выбирать число векторов на секторе.

Представленные замечания не носят принципиального характера и не снижают научной и практической ценности диссертационной работы.

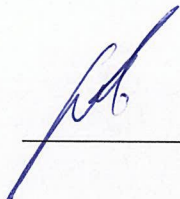
### **Заключение**

Диссертация представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, содержащую решение актуальной задачи в области систем преобразования электрической энергии аэрокосмической техники, жилых зданий и соответствующую специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы». Автореферат отражает основное содержание диссертационной работы.

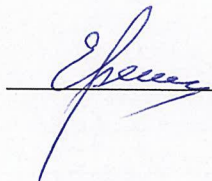
На основании вышеизложенного считаем, что диссертационная работа на тему «Инверторы в режиме векторной широтно-импульсной модуляции для управления асинхронными двигателями» по своему содержанию и полученным результатам удовлетворяет требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», а ее автор Ле Дык Тиеп заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы».

Отзыв рассмотрен на заседании кафедры «Электротехнические комплексы автономных объектов и электрический транспорт» НИУ «МЭИ» 05.07.2018, протокол № 07/18.

Зав. кафедрой ЭКАОиЭТ  
к.т.н. (специальность 05.09.03  
«Электротехнические комплексы и  
системы»), с.н.с.

  
\_\_\_\_\_ М.Ю. Румянцев

Профессор кафедры ЭКАОиЭТ  
д.т.н. (специальность 05.09.12 «Силовая  
электроника»), профессор

  
\_\_\_\_\_ В.Г. Еременко

Ученый секретарь кафедры ЭКАОиЭТ  
к.т.н. (специальность 05.09.01  
«Электромеханика и электрические  
аппараты»), доцент

  
\_\_\_\_\_ С.Ю. Останин

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ».  
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, тел.: +7 (495) 362-75-60, факс: +7 (495) 362-89-38, e-mail: universe@mpei.ac.ru, сайт: www.mpei.ru.

**Румянцев Михаил Юрьевич** – заведующий кафедрой электротехнических комплексов автономных объектов и электрического транспорта (ЭКАОиЭТ) ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», к.т.н. (специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы»), с.н.с.

**Ерёменко Владимир Григорьевич** – профессор кафедры электротехнических комплексов автономных объектов и электрического транспорта (ЭКАОиЭТ) ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», д.т.н. (специальность 05.09.12 «Силовая электроника»), профессор.

**Останин Сергей Юрьевич** – ученый секретарь кафедры электротехнических комплексов автономных объектов и электрического транспорта (ЭКАОиЭТ) ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», к.т.н. (специальность 05.09.01 «Электромеханика и электрические аппараты»), доцент.

М.Ю. Румянцев



В.Г. Ерёменко



С.Ю. Останин

