

«УТВЕРЖДАЮ»

Первый проректор – проректор  
по научной и инновационной работе  
ФГБОУ ВО «Магнитогорский  
государственный технический  
университет им. Г.И. Носова»,  
Магнитогорск



М.В. Чукин

«07» апреля 2017 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, на диссертационную работу Маклакова Александра Сергеевича «Повышение энергоэффективности трехуровневого преобразователя частоты с фиксированной средней точкой в составе электропривода большой мощности», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.12 «Силовая электроника» в диссертационный совет Д 212.298.05 при ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

### 1. Актуальность работы

Системы высоковольтных электроприводов переменного тока большой мощности, имеющие в своем составе трехуровневые преобразователи частоты с фиксированной средней точкой, получили широкое распространение во всех областях промышленности. В современных системах распределения и передачи электрической энергии данный тип преобразователей также является одним из самых востребованных. Снижение потерь на преобразование и повышение качества электрической энергии посредством управления переключением полупроводниковых модулей любой топологии преобразователей являются наиболее актуальными задачами последних десятилетий. Особенно сложными объектами для решения данных задач являются системы электроприводов большой мощности.

Тема диссертационного исследования Маклакова Александра Сергеевича связана с повышением энергоэффективности трехуровневых преобразователей частоты с фиксированной средней точкой в составе электропривода большой мощности. Выбранное направление исследования имеет существенные перспективы дальнейшего развития и находится в тренде проводимых исследований по всему миру. Об этом свидетельствует немалое количество публикации, связанных с решением различных вопросов в области электромагнитной совместимости и энергоэффективности многоуровневых полупроводниковых преобразователей.

В связи с вышесказанным, сделан вывод об актуальности диссертационной работы.

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

Достоверность научных результатов определяется корректностью поставленных задач, обоснованностью принятых допущений при разработке математического описания и достаточной сходимостью результатов математического моделирования с результатами экспериментальных исследований. Основные научные выводы и положения подтверждаются теоретическим анализом, результатами моделирования и экспериментальных исследований. Все выносимые на защиту научные положения являются обоснованными и не противоречат известным научным положениям.

## **3. Основные результаты диссертационной работы**

Первым значимым результатом проведенных исследований является разработанное математическое описание трехуровневого преобразователя частоты с фиксированной средней точкой, которое отличается от известных тем, что позволяет учитывать разбаланс напряжений в звене постоянного тока в зависимости от работы как активного выпрямителя, так и инвертора напряжения. Разработанная математическая модель прошла проверку на адекватность путем сравнения результатов расчетов с результатами экспериментальных исследований на главном приводе прокатной клетки стана 5000 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

Вторым значимым результатом является разработанный гибридный алгоритм модуляции, позволяющий осуществить изменение метода модуляции трехуровневого преобразователя частоты с фиксированной средней точкой в режиме реального времени. Особенностью данного алгоритма является возможность минимизировать количество коммутаций полупроводниковых ключей преобразователя в зависимости от режима работы привода.

Третьим значимым результатом являются проведенные методом математического моделирования исследования гибридного алгоритма модуляции на разработанной комплексной модели главного электропривода прокатной клетки стана 5000 ОАО «ММК» в программе Matlab/Simulink. При сравнении с результатами экспериментальных исследований была доказана адекватность разработанных моделей алгоритмов пространственно-векторной широтно-импульсной модуляции и широтно-импульсной модуляции с удалением выделенных гармоник. Было продемонстрировано, что гибридный алгоритм модуляции позволяет значительно снизить количество переключений полупроводниковых модулей инвертора напряжения, не ухудшая показатели качества электроэнергии.

## **4. Новизна научных положений и значение выводов и рекомендаций для науки и практики:**

- новизна предложенного автором способа повышения энергоэффективности силовых полупроводниковых преобразователей заключается в применении гибридного алгоритма модуляции, позволяющего осуществить переход между двумя различными методами широтно-импульсной модуляции для снижения числа переключений в силовой схеме инвертора напряжения с сохранением требуемых показателей качества электроэнергии;

- новизна предложенной математической модели трехуровневого преобразователя частоты с фиксированной средней точкой, построенной на основе дискретных логических

функций, описывающих состояния полупроводниковых приборов, заключается в возможности учета разбаланса напряжений в звене постоянного тока в зависимости от работы активного выпрямителя и инвертора напряжения;

- практическая значимость разработанного гибридного алгоритма модуляции заключается в возможности повышении КПД инвертора при сохранении требуемых показателей качества потребляемой электроэнергии промышленных электроприводов большой мощности различного применения.

## **5. Заключение о соответствии диссертации установленным критериям**

Диссертационная работа имеет внутреннее структурное единство, изложена на 129 страницах машинописного текста, содержит 77 рисунков, 22 таблицы, 118 наименований цитируемой литературы.

Цель работы – разработка гибридного алгоритма модуляции для повышения энергоэффективности трехуровневого преобразователя частоты в составе электропривода большой мощности полностью достигнута в диссертации.

Тема, содержание и научные положения диссертации Маклакова А.С. соответствуют формуле и области исследования, приведенных в паспорте специальности 05.09.12, в частности: первое научное положение соответствует п. 4 (математическое и схмотехническое моделирование преобразовательных устройств) и п. 5 (разработка научных подходов, методов, алгоритмов и программ, обеспечивающих адекватное отражение в моделях физической сущности электромагнитных процессов и законов функционирования устройств силовой электроники); второе и третье научные положения соответствуют п. 3 (оптимизация преобразователей, их отдельных, функциональных узлов и элементов); четвертое научное положение соответствует п. 2 (теоретический анализ и экспериментальные исследования процессов преобразования (выпрямления, инвертирования, импульсного, частотного и фазочастотного регулирования и т.п.) в устройствах силовой электроники с целью улучшения их технико-экономических и эксплуатационных характеристик).

Диссертационная работа Маклакова А.С. написана понятным языком, корректным в научном и техническом отношении. Редакционное оформление диссертации замечаний не вызывает.

## **6. Соответствие содержания автореферата содержанию диссертации**

Автореферат диссертации Маклакова А.С. соответствует диссертационной работе по цели, предмету, идеи и задачам исследования, основным научным положениям, новизне и практической ценности.

Содержание автореферата полностью отражает текстовый материал диссертационной работы, полученные научные результаты, основные выводы и рекомендации.

## **7. Соответствие содержания диссертации содержанию опубликованных работ**

Результаты исследования опубликованы в 16 печатных работах, которые включают 4 статьи в журналах, рекомендуемых ВАК РФ, 7 статей в изданиях, входящих в систему цитирования Scopus. В представленных публикациях достаточно полно отражены все основные положения, выводы и рекомендации диссертации.

## 8. Замечания и дискуссионные положения

1. Вторая глава посвящена разработке математической модели исследуемого объекта. Вначале дано описание преобразователя в неподвижной системе координат  $abc$ , затем – в вращающейся системе  $dq$ , на основе чего проведен расчет регуляторов векторной системы управления, необходимый обычно для достижения динамических показателей объекта. Следует отметить, эта часть работы (12 страниц текста – около 10% объема диссертации) в дальнейшем оказалась невостребованной, т.к. исследования, проводимые автором, затрагивают в основном статические режимы.

2. В третьей главе рассмотрен метод пространственно-векторной широтно-импульсной модуляции на основе «базовой последовательности», который применим, как известно, в основном к общепромышленным преобразователям частоты. В диссертационной работе предметом исследования являются преобразователи больших мощностей – единицы-десятки мегаватт, поэтому целесообразно было бы привести литературный обзор «последовательностей переключений» с учетом этой специфики.

3. В выводах по третьей главе сказано «созданы логические модели алгоритма ПВШИМ», которые реализованы в программной среде Matlab/Simulink. Однако структурные схемы указанных моделей ни в третьей, ни в четвертой главах не приведены. Упомянутые модели выносятся автором как одно из положений, обладающих научной новизной, и поэтому должны быть представлены.

Вопросы:

1. Насколько универсальным является разработанный гибридный алгоритм модуляции для широкого класса электроприводов большой мощности, различающихся характером нагрузки (вентиляторная, ударная, резкопеременная и т.д.)?

2. Из работы неясно, какие электрические и технологические параметры электропривода являются определяющими для выбора того или иного алгоритма ШИМ и какую часть от цикла прокатки может составлять режим работы с пространственно-векторной широтно-импульсной модуляцией и с методом удаления выделенных гармоник?

3. В качестве объекта экспериментальных исследований был принят главный электропривод толстолистового стана 5000, работа которого сопровождается частыми динамическими режимами. Насколько приемлем для данного объекта алгоритм ШИМ с УВГ, у которого коэффициент модуляции ограничен диапазоном  $0,7...0,9$ ?

Замечания по оформлению работы:

1. На рис. 4.2-4.3 приведены обозначения обмоток трансформаторов в виде затемнённых прямоугольников, что не соответствует общепринятым обозначениям в РФ.

2. На рис. 2.1, 2.5, 2.6 (всего 6 раз) напряжения на конденсаторах звена постоянного тока показаны в виде стрелочек, направленных в противоположную сторону.

3. В системе уравнений (2.6), записанных для мгновенных значений токов и напряжений, некорректно используется символ  $Z$  – полное комплексное сопротивление, допустимой областью применения которого являются уравнения в комплексной форме записи.

4. Имеет место несоответствие в обозначении векторов на рис. 3.1 и в таблицах 3.5-3.7, в частности, это касается векторов с индексами 2, 3, 4, 5 и т.д. до 18.

Указанные недостатки не являются принципиальными и не снижают научной и практической ценности диссертационной работы.

### **Заключение**

Диссертационная работа Маклакова Александра Сергеевича «Повышение энергоэффективности трехуровневого преобразователя частоты с фиксированной средней точкой в составе электропривода большой мощности» по объему исследований, их глубине, научной и практической значимости удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к научно-квалификационным работам на соискание ученой степени кандидата наук согласно «Положения о присуждении ученых степеней» (утверждено постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 №842), а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.12 – «Силовая электроника». Проверка диссертации в системе «Антиплагиат.ВУЗ» показала, что итоговая оригинальность по отношению к имеющимся базам данных составляет 88,7%.

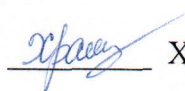
Диссертационная работа и отзыв обсуждены и одобрены на заседании кафедры электроснабжения промышленных предприятий Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» 4 апреля 2017 г., протокол № 10.

Доктор техн. наук, профессор, заведующий  
кафедрой электроснабжения промышленных  
предприятий Федерального государственного  
бюджетного образовательного учреждения  
высшего образования «Магнитогорский  
государственный технический университет  
им. Г.И. Носова»,  
455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38



Корнилов Геннадий Петрович

Кандидат техн. наук, доцент кафедры  
электроснабжения промышленных  
предприятий Федерального государственного  
бюджетного образовательного учреждения  
высшего образования «Магнитогорский  
государственный технический университет  
им. Г.И. Носова»,  
455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38



Храмшин Тимур Рифхатович