

## Отзыв

на автореферат диссертации Маклакова Александра Сергеевича на тему:  
«Повышение энергоэффективности трехуровневого преобразователя частоты с фиксированной средней точкой в составе электропривода большой мощности», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.12 – «Силовая электроника»

В диссертационной работе рассматривается актуальная научно-техническая проблема повышения энергоэффективности силовых полупроводниковых преобразователей в области современного высоковольтного электропривода переменного тока.

В представленной работе разработан гибридный алгоритм модуляции трехуровневого преобразователя частоты с фиксированной средней точкой, который позволил снизить количество переключений полупроводниковых модулей у исследуемого объекта. Это привело к повышению КПД инвертора и при этом обеспечило сохранение идентичных суммарных коэффициентов гармонических составляющих тока и напряжения преобразователя со стороны нагрузки. Данное исследование безусловно обладает практической значимостью и актуальностью.

Автором предложен новый подход к реализации математического описания трехуровневого преобразователя частоты с фиксированной средней точкой, а также программно реализованы алгоритмы широтно-импульсной модуляции с удалением выделенных гармоник и пространственно-векторной широтно-импульсной модуляций. Это позволило провести детальное моделирование электромагнитных процессов в силовой схеме исследуемого электропривода и оценить показатели качества преобразованной электроэнергии.

Результаты исследований определили перспективы возможного повышения КПД и улучшения показателей качества потребляемой электроэнергии систем высокомошного электропривода переменного тока для различных областей промышленности.

По автореферату имеются следующие замечания:

1. В автореферате не приведены осциллограммы токов и напряжений, полученных в ходе экспериментальных исследований, что не позволяет в полной мере сопоставить реальные переходных процессы с результатами математического моделирования;

2. Перспективным алгоритмом модуляции для активных выпрямителей является алгоритм минимизации показателя суммарного гармонического искажения тока или напряжения. В работе же рассмотрен только алгоритм широтно-импульсной модуляции с удалением выделенных гармоник.

Приведенные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы, представляющей собой законченное научное исследование по актуальной тематике.



**О Т З Ы В**  
**на автореферат диссертации**  
**Маклакова Александра Сергеевича**  
**«Повышение энергоэффективности трехуровневого преобразователя частоты с фиксированной средней точкой в составе электропривода большой мощности»,**  
**представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности**  
**05.09.12 – Силовая электроника**

Маклаковым А. С. выполнена диссертационная работа на актуальную тему для теории и практики многоуровневых преобразователей частоты, предназначенных для работы в составе электропривода.

В автореферате четко сформулированы цели и задачи, позволяющие оценить уровень работы и глубину проработки темы.

**Методы исследования.** Теоретические исследования и решение поставленных задач проводились с помощью использования аналитических и численных методов решения алгебраических уравнений и систем дифференциального и интегрального исчисления, преобразования Фурье, теории матриц, метода обобщенных векторов, логических операций, методов аналитической геометрии, методов численного моделирования, базовых положений теории автоматического управления и методов синтеза регуляторов многосвязных систем. Разработанные логико-математические модели реализованы в среде визуального программирования *MatLab/Simulink*. Экспериментальные исследования проводились в промышленных условиях на действующем оборудовании.

**Обоснованность и достоверность научных положений** обеспечивается научно-обоснованной постановкой задачи и корректным применением современных методов математического моделирования и подтверждается результатами выполненных расчетов, результатами экспериментальных исследований.

**Научная новизна**

1. Разработан способ повышения энергоэффективности трехуровневого преобразователя частоты с фиксированной средней точкой

на основе гибридного алгоритма модуляции в составе электропривода большой мощности;

2. Создана логико-математическая модель трехуровневого преобразователя частоты с фиксированной средней точкой для исследования совместной работы активного выпрямителя напряжения и автономного инвертора напряжения при алгоритме пространственно-векторной ШИМ с базовой последовательностью переключений пространственных векторов и при алгоритме ШИМ с удалением выделенных гармоник с четвертьволновой симметрией, расчета электромагнитных процессов и анализа показателей качества преобразуемой электроэнергии;

3. Разработан гибридный алгоритм модуляции, позволяющий повысить КПД преобразователя путем осуществления переключения между алгоритмами пространственно-векторной ШИМ и ШИМ с удалением выделенных гармоник.

**Практическая значимость** работы состоит в том, что разработаны технические предпосылки для повышения энергоэффективности трехуровневого преобразователя частоты с фиксированной средней точкой в составе промышленных электроприводов большой мощности различного применения. Практическое использование предложенного гибридного алгоритма модуляции трехуровневого преобразователя частоты с фиксированной средней точкой позволит повысить КПД и улучшить показатели качества потребляемой электроэнергии систем электропривода большой мощности. Результаты исследований внедрены в учебный процесс Южно-Уральского государственного университета (НИУ).

**Работа прошла хорошую апробацию**, поскольку ее результаты опубликованы в 16 печатных трудах, в том числе 4 статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Минобрнауки России, 7 статей в изданиях, индексируемых в международных системах цитирования Scopus и WoS.

**Автореферат** написан литературным языком с использованием терминологии, принятой в данной отрасли науки и техники. Стиль изложения – доказательный.

**По автореферату имеются следующие замечания:**

1) какие единицы измерения имеет правая часть последних двух уравнений системы (1)?

2) на рис. 2 показана  $R-L-E$  нагрузка, однако в тексте автор не поясняет, что она собой представляет?

3) в автореферате приводится количественная оценка совпадения результатов теоретического и экспериментального исследования, однако экспериментальные данные не приводятся.

Оценивая уровень работы в целом, можно заключить, что выполненная диссертационная работа является завершённой, соответствует требованиям Положения о присуждении ученых степеней, а ее автор – Макалов Александр Сергеевич – заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.12 – Силовая электроника.

Зав. кафедрой электропривода и электротехники  
ФГБОУ ВО «Казанский национальный  
исследовательский технологический  
университет», д. т. н., доцент, научная специальность  
05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

  
Макаров Валерий Геннадьевич

Доцент кафедры электропривода и электротехники  
ФГБОУ ВО «Казанский национальный  
исследовательский технологический  
университет», к. т. н., доцент, научная специальность  
05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

  
Цвенгер Игорь Геннадьевич

Подпись Макарова В.Г. и  
Цвенгера И.Г.  
удостоверяется.  
Начальник ОФАП ФГБОУ ВО «КНИТУ»  
  
С.А. Перельгин  
«12» 04 2017



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет», кафедра электропривода и электротехники  
420029 г. Казань, ул. Сибирский тракт, 12  
тел. (843) 231-41-27  
e-mail: [electroprivod@list.ru](mailto:electroprivod@list.ru)

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Маклакова Александра Сергеевича  
на тему: «Повышение энергоэффективности трехуровневого  
преобразователя частоты с фиксированной средней точкой в составе  
электропривода большой мощности», представленной на соискание ученой  
степени кандидата технических наук по специальности  
05.09.12 – «Силовая электроника»

В настоящее время повышение энергоэффективности высокомоощных силовых полупроводниковых преобразователей является весьма актуальной задачей. Это обусловлено рядом экономических факторов, среди которых можно выделить возможность снижения затрат на электрическую энергию за счет повышения общего КПД всей системы электропривода. Поэтому проведенное Маклаковым А.С. исследование, посвященное разработке способа повышения энергоэффективности трехуровневого преобразователя частоты с фиксированной средней точкой в составе электропривода большой мощности, является актуальным.

В работе выявлено отсутствие на данный момент удобного математического описания трехуровневых преобразователей частоты с фиксированной средней точкой, которое позволило бы проводить исследования электромагнитных процессов в системе «Сеть – Преобразователь – Нагрузка». Предложенное соискателем математическое описание трехуровневого преобразователя частоты с фиксированной средней точкой позволило создать адекватную математическую модель исследуемого электропривода и оценить возможности повышения его энергоэффективности.

Разработан новый гибридный алгоритм модуляции, который позволил уменьшить динамическую нагрузку полупроводниковых модулей трехуровневого преобразователя частоты с фиксированной средней точкой и обеспечил увеличение его КПД порядка 1%.

Результаты диссертационного исследования достаточно полно опубликованы и докладывались на конференциях различного уровня.

По содержанию автореферата имеется следующее замечание. В автореферате не сказано, каким образом разработанный гибридный алгоритм модуляции будет применен на действующем оборудовании.

Отмеченное замечание не снижает общего впечатления от работы.

Представленная работа соответствует требованиям ВАК РФ к кандидатским диссертациям. Соискатель, Маклаков Александр Сергеевич, заслуживает присвоения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.12 – «Силовая электроника».

Доктор технических наук, профессор  
кафедры «Промышленная  
электроника» ФГБОУ ВО  
«Комсомольский-на-Амуре  
государственный технический  
университет»  
г. Комсомольск-на-Амуре



Климаш Владимир Степанович

11 апреля 2017 г.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный  
технический университет»  
681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, д. 27,  
тел. (4217) 241-192, e-mail: pe@knastu.ru, http://knastu.ru

11 апреля 2017 г.

Против включения моих персональных данных в документы, связанные  
с рассмотрением диссертации Маклакова А.С., не возражаю.

Подпись Климаша Владимира Степановича заверяю

Ученый секретарь ФГБОУ ВО «КНАГТУ»

Б.В. Шишкин

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Маклакова Александра Сергеевича  
на тему: «Повышение энергоэффективности трехуровневого преобразователя частоты  
с фиксированной средней точкой в составе электропривода большой мощности»,  
представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.09.12 – «Силовая электроника»

В связи с постоянным ростом стоимости электроэнергии повышение энергоэффективности различных производственных объектов является одной из актуальных проблем на промышленном предприятии. Диссертационная работа Маклакова А.С. посвящена вопросам повышения энергоэффективности систем высокомоощных электроприводов переменного тока, что является наиболее целесообразным и экономически выгодным.

В диссертационной работе Маклакова А.С. предложен способ повышения КПД высоковольтного преобразователя частоты за счет разработанного модифицированного алгоритма модуляции. Указанный способ основан на использовании двух различных методов модуляции автономного инвертора напряжения. Представленный метод способствует снижению коммутационных потерь в силовой схеме преобразователя за счет снижения их количества при включении алгоритма широтно-импульсной модуляции с удалением выделенных гармоник вместо пространственно-векторной широтно-импульсной модуляции.

Автором предложено математическое описание трехуровневого преобразователя частоты с фиксированной средней точкой, основанное на применении дискретных логических функций, определяющих уровень подключаемого напряжения в каждой фазе инвертора. Предложенное математическое описание позволяет проводить исследования электромагнитных процессов в силовой цепи преобразователя при учете совместной работы выпрямителя и инвертора.

Основные научные положения и выводы прошли достаточную апробацию на региональных, всероссийских и международных конференциях. Соискателем опубликовано 4 статьи в периодических изданиях, входящих в перечень ВАК РФ и 7 статей в изданиях, включенных в базу Scopus.

Необходимо отметить, что результаты диссертационной работы имеют практическую значимость. Разработаны технические предпосылки для повышения энергоэффективности трехуровневых преобразователей частоты с фиксированной средней точкой в составе промышленных электроприводов большой мощности для различных областей применения.

По автореферату следует сделать следующие замечания:

1. Из автореферата неясно, в какие моменты возможно осуществить смену алгоритмов между широтно-импульсной модуляцией с удалением выделенных гармоник и пространственно-векторной широтно-импульсной модуляцией.

2. В автореферате указано, что эффект от разработанного гибридного алгоритма состоит в снижении количества переключений полупроводниковых транзисторных модулей инвертора и повышение его КПД порядка 1%. Будут ли достигнуты аналогичные показатели для преобразователей с запираемыми тиристорами?



В целом, судя по автореферату, несмотря на указанные замечания, в диссертации Маклакова Александра Сергеевича решена важная прикладная задача повышения КПД высоковольтного преобразователя частоты за счет разработанного модифицированного алгоритма модуляции, обеспечивающего улучшение энергетических и массогабаритных показателей полупроводниковых преобразователей, и она отвечает требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней» от 24 сентября 2013 г. № 842". Диссертант Маклаков Александр Сергеевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.12 – «Силовая электроника».

Заведующий кафедрой  
электротехники и прецизионных  
электромеханических систем

Университета ИТМО,

кандидат технических наук, доцент

Томасов Валентин Сергеевич

19 апреля 2017 г.

197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, д.49,  
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский  
университет информационных технологий, механики и оптики»  
(Университет ИТМО),  
тел: +7(812) 233-83-36, e-mail: tomasov@ets.ifmo.ru

Подпись *Томасова ВС*  
удостоверяю  
Начальник *ИТМО*  
Университета ИТМО *ИТМО*



## О Т З Ы В

на автореферат диссертационной работы Маклакова А.С.  
по теме: «Повышение энергоэффективности трехуровневого преобразователя частоты с фиксированной средней точкой в составе электропривода большой мощности», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.12 – «Силовая электроника»

В настоящее время на крупных отечественных предприятиях внедрены и внедряются высоковольтные системы электроприводов большой мощности на основе многопульсных силовых схем соединения с питающей сетью и трехуровневых преобразователей частоты с фиксированной средней точкой.

Ввиду того, что выполнение отечественных и международных стандартов электромагнитной совместимости и энергосбережения для электроприводов переменного тока номинальной мощности порядка десятков мегаватт оказывается достаточно трудной и наукоемкой задачей, то исследования в этой области, направленные на повышения энергоэффективности и качества потребляемой электроэнергии, являются наиболее актуальными.

Автором предложен способ повышения энергоэффективности трехуровневого преобразователя частоты с фиксированной средней точкой в составе электропривода большой мощности за счет применения гибридного алгоритма модуляции автономного инвертора напряжения, что позволяет не использовать дополнительные капитальные вложения для его внедрения. Разработанный гибридный алгоритм позволяет осуществить переключение между алгоритмами пространственно-векторной широтно-импульсной модуляции и широтно-импульсной модуляции с удалением выделенных гармоник в зависимости от режима работы привода.

В работе приведено математическое описание трехуровневого преобразователя частоты с фиксированной средней точкой, которое позволило провести качественный анализ спектров тока и напряжения в исследуемой системе электропривода.

Автореферат отражает основное содержание диссертации, написан технически и литературно грамотным языком. Однако, в процессе ознакомления с текстом автореферата возникают следующие замечания и вопросы:



## ОТЗЫВ

**на автореферат диссертации Маклакова Александра Сергеевича «Повышение энергоэффективности трехуровневого преобразователя частоты с фиксированной средней точкой в составе электропривода большой мощности», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.12 – Силовая электроника**

Диссертация посвящена актуальной теме: разработке алгоритмов управления многоуровневыми преобразователями частоты, обладающих хорошими энергетическими характеристиками, электромагнитной совместимостью с питающей сетью и нагрузкой. Что обусловлено все более жесткими технологическими требованиями к качеству управления, обеспечения энергоэффективности полупроводниковых преобразователей, и улучшения показателей качества электроэнергии в питающих линиях. Автором предложено для решения этих задач использовать преобразователь частоты на базе активного выпрямителя (АВН) и автономного инвертора напряжения (АИН) с разработанным гибридным алгоритмом модуляции.

Научную новизну представляют: способ повышения энергоэффективности трехуровневого ПЧ на основе гибридного алгоритма модуляции; логико-математическая модель работы АВН и АИН с пространственно-векторной ШИМ и ШИМ с удалением выделенных гармоник, используемых в зависимости от режима работы преобразователя. Практическая полезность работы заключается в повышении КПД и улучшении показателей качества электроэнергии систем электроснабжения высоковольтных электроприводов большой мощности для различных областей применения.

Работа прошла достаточную апробацию, результаты её доложены и опубликованы на международных конференциях IEEE, внедрены в учебный процесс подготовки бакалавров по направлению «Мехатроника и робототехника» Южно-Уральского государственного университета.

По автореферату имеются следующие замечания:

1. Из автореферата неясно, учитывал ли автор взаимное влияние электроприводов рабочих валков прокатной клетки стана 5000 ЛПЦ №9 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» на режимы работы преобразователей частоты, так как рабочие валки стана оказывают нелинейное механическое воздействие друг на друга при пластической деформации прокатываемого материала, проходящего через клетку (рис. 4 стр. 12). И оценивал ли автор степень этого влияния на показатели качества преобразуемой электроэнергии.

2. Было бы хорошо получить свидетельство о регистрации программы для ЭВМ для практического подтверждения работоспособности предложенных алгоритмов управления.

Отмеченные замечания не меняют общей положительной оценки диссертационной работы. Основное содержание работы достаточно отражено в автореферате и публикациях. В работе содержится ряд новых, оригинальных перспективных решений для практической реализации, при этом необходимые разработки, исследования и внедрения с новыми полезными научными результатами выполнены, и достоверность их доказана.

В целом, выполненные разработки, исследования и практические результаты Маклакова А.С. следует квалифицировать как законченное решение актуальной задачи разработки методов и алгоритмов модуляции для повышения эффективности трехуровневого преобразователя частоты с фиксированной средней точкой в составе электропривода большой мощности. Анализ автореферата, показывает, что представленная к защите работа соответствует всем требованиям п.9 «Положения ВАК Российской Федерации о присуждении учёных степеней», а её автор Маклаков Александр Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.12 – Силовая электроника.

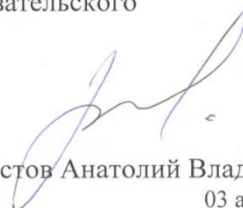
Зам. заведующего кафедрой  
электропривода электрооборудования  
Национального исследовательского  
Томского политехнического университета,  
к.т.н., доцент  
634050, г. Томск, пр. Ленина,30; ТПУ, ЭНИН  
сот. 89138128813; [kladiev@tpu.ru](mailto:kladiev@tpu.ru)

Кладиев Сергей Николаевич  
03 апреля 2017 г.



Профессор кафедры электропривода  
и электрооборудования Национального исследовательского  
Томского политехнического университета,  
д.т.н.  
634050, г. Томск, пр. Ленина,30; ТПУ, ЭНИН  
сот. 89138128813; [parist@sibmail.com](mailto:parist@sibmail.com)  
8913 850 1624

Аристов Анатолий Владимирович  
03 апреля 2017 г.



Подпись Аристова А.В. и Кладиева С.Н. заверяю:

Ученый секретарь Национального  
исследовательского Томского  
политехнического университета



О.А. Ананьева