

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук, профессора
Брованова Сергея Викторовича на диссертационную работу Ле Ван Кань
на тему «Повышение энергосбережения электроприводов переменного
тока на базе трёхуровневых преобразователей частоты с фиксированной
нейтральной точкой», представленную на соискание учёной степени
кандидата технических наук по научной специальности

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

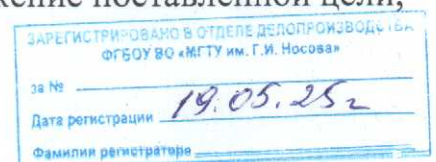
1. Актуальность темы диссертационной работы

Полупроводниковые преобразователи частоты широко применяются в различных областях, включая электропривод. При этом отмечается тенденция увеличения мощности преобразователя, повышения энергоэффективности, энергосбережения и качества преобразования электрической энергии. Эти обстоятельства обуславливают применение современных статических полупроводниковых преобразователей, в частности, трёхуровневых и разработку новых алгоритмов управления ими на базе векторной ШИМ.

В связи с этим диссертационная работа Ле Ван Кань посвящена актуальной задаче повышения энергоэффективности электроприводов (ЭП) переменного тока на основе трёхуровневых полупроводниковых инверторов напряжения (АИН) с фиксированной нейтральной точкой (ФНТ) за счёт оптимизации алгоритмов векторной ШИМ.

Целью диссертационной работы автор обозначил повышение энергосбережения электропривода на базе трёхуровневого преобразователя частоты посредством усовершенствованной системы управления автономного инвертора напряжения на основе пространственно-векторной широтно-импульсной модуляции (ПВШИМ).

В рамках решения задач, направленных на достижение поставленной цели,



Ле Ван Кань проанализировал принцип работы трехуровневого АИН и его основные технические характеристики, включая качество преобразованной электроэнергии, коммутационные потери, баланс напряжения нейтральной точки (НТ) и уровень синфазного (СФ) напряжения. Разработаны системы управления АИН на основе ПВШИМ с пятиступенчатой, семиступенчатой и гибридной последовательностями переключений (ПП). Разработана имитационная модель главного ЭП горизонтального валка толстолистного стана 5000 для оценки эффективности применения усовершенствованной системы управления. Для подтверждения достоверности полученных результатов были проведены экспериментальные исследования.

2. Структура и содержание диссертационной работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, приложения и списка литературы из 162 наименований. Работа изложена на 180 страницах машинописного текста, содержит 77 рисунков и 21 таблицу.

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы идея, цели и задачи исследования; определены предмет и объект исследования; изложены научная новизна и практическая значимость работы; приведены основные научные положения, выносимые на защиту; отражены вопросы реализации и апробации полученных результатов.

В первой главе представлены различные структуры многоуровневых преобразователей частоты (ПЧ), приведены области их применения. Рассмотрены существующие алгоритмы ШИМ для систем управления ПЧ. Выделены основные технические проблемы трехуровневого АИН с фиксацией нейтральной точки в составе ЭП и обоснована целесообразность применения алгоритма ПВШИМ в системе управления трехуровневого АИН для их решения.

Во второй главе описана силовая схема и принцип работы АИН в составе ЭП. Проведен анализ факторов, вызывающих разбаланс напряжений нейтральной точки конденсаторов и возникновения синфазного напряжения. Разработана общая имитационная модель ЭП–ПЧ с применением ПВШИМ для трехуровневого АИН.

Выполнен сравнительный анализ применения трех классических последовательностей переключения комбинаций состояний ключей в ПВШИМ для трехуровневого АИН.

В третьей главе предложены три вида ПВШИМ для системы управления АИН. С помощью имитационной модели, представленной во второй главе, был проведен анализ работы ЭП–ПЧ, который показал улучшение ряда показателей, которые были выбраны в качестве критериев оценки энергосбережения ЭП–ПЧ.

В четвёртой главе представлены результаты экспериментальных исследований, проведённых на лабораторном стенде. Полученные данные подтвердили расчетные результаты при имитационном моделировании.

В пятой главе разработана имитационная модель главного ЭП горизонтального вала толстолистного стана 5000 с использованием среды моделирования Matlab Simulink. Проведён анализ работы данной системы с применением системы управления построенной на предложенном алгоритме ПВШИМ 2, что подтвердило его эффективность.

В заключении приведены основные выводы и научные результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы.

3. Достоверность и научная новизна диссертационной работы

Достоверность полученных результатов и выводов, представленных в диссертационной работе, подтверждена корректностью проведенных математических выкладок, обоснованными допущениями, сделанными при исследовании, а также сопоставлением результатов, полученных теоретически, экспериментально и имитационным моделированием.

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

1. Разработана общая имитационная модель ЭП–ПЧ, позволяющая проводить анализ показателей качества преобразования электрической энергии с различными последовательностями переключения ключей трехфазного АИН.

2. Предложены алгоритмы ПВШИМ для системы управления трехфазного АИН с пятиступенчатой последовательностью переключения - ПВШИМ 1, с семиступенчатой последовательностью переключения - ПВШИМ 2 и с гибридной последовательностью - ПВШИМ 3, позволяющие улучшить показатели качества преобразования электрической энергии.

3. Разработана имитационная модель главного ЭП горизонтального вала толстолистного стана 5000 с использованием алгоритма управления трехуровневого АИН на основе ПВШИМ 2, что способствует повышению энергосбережения системы электропривода.

4. Научная и практическая значимость

Научная и практическая значимость диссертационной работы заключается в разработанных алгоритмах ПВШИМ, позволивших повысить энергосбережение электроприводов переменного тока на базе трехуровневых преобразователей с фиксированной нейтральной точкой. Алгоритмы управления позволили снизить потери мощности на переключениях силовых ключей преобразователя, улучшить формы выходного напряжения и тока ПЧ, а также повысить баланс напряжений нейтральной точки конденсаторов при одновременном снижении уровня синфазного напряжения.

Представленные решения могут быть использованы для электропривода в металлургии, горнодобывающей промышленности, электротранспорте и возобновляемой энергетике. Тем самым диссертационное исследование Ле Ван Кань вносит вклад в развитие современной электроэнергетики и технологий преобразования электроэнергии.

5. Публикации по работе

Основные положения диссертации достаточно полно представлены в 10 работах, опубликованных соискателем, включая 4 статьи в журналах из перечня рецензируемых научных изданий, рекомендованного ВАК, и 5 публикаций в изданиях, входящих в систему цитирования Scopus.

6. Оценка содержания диссертации

Диссертационная работа технически грамотно изложена, содержит достаточное количество графического материала, поясняющего и иллюстрирующего соответствующие научные положения и технические решения. По содержанию диссертации можно отметить следующие **замечания**:

- 1) Для оценки качества ПВШИМ 1 автор использовал два критерия – максимальное относительное отклонение напряжения нейтральной точки и суммарный коэффициент гармонических искажений тока, однако не использовал другие, которые им были введены для оценки качества ПВШИМ. Это не дает возможности провести полное сравнение с другими вариантами ПВШИМ.
- 2) На странице 88 автор говорит, что максимальное относительное отклонение напряжения нейтральной точки не достигает нулевого значения, поскольку ПВШИМ 2 формирует среднее значение тока НТ, а не мгновенное. Это так, но дополнительной причиной и, может быть более существенной, является ограничение Δu , отмеченное в выражениях (3.23), которое не может принимать значения более 1 и менее -1.
- 3) Авторы *Nikola Celanovic* и *Dushan Boroyevich* в своих работах показали ограничение возможности подавления пульсаций напряжения нейтральной точки при регулировании длительностей включения малых векторов. Наибольшее значение глубины модуляции, при которой достигается подавление пульсаций тока нейтральной точки равно 0,96 при чисто активной нагрузке, т.е. $\cos \varphi = 1$. При увеличении угла φ подавление пульсаций достигается при меньших значениях глубины модуляции. Автор при анализе пульсаций, возникающих при применении ПВШИМ 2, не говорит о параметрах нагрузки, поэтому сложно проводить анализ с уже имеющимися ранее опубликованными результатами.
- 4) Автору следовало бы проанализировать поведение предлагаемых ПВШИМ в динамике работы электропривода, если такие режимы предусмотрены.

- 5) На стр. 44 и 45 автор называет схему трехуровневого преобразователя с фиксацией нейтральной точки, представленную на рис. 2.1, «классической силовой схемой АИН» или «стандартной схемой АИН», что не совсем корректно.
- 6) На стр. 118, рис. 4.7 д, е визуально наблюдается разница напряжений на конденсаторах в звене DC по постоянной составляющей. Чем автор может это объяснить?
- 7) В диссертации присутствуют опечатки. Например, на стр. 51 первая строка вместо $\bar{U}_6 = 1/\sqrt{3}$ должно быть $\bar{U}_M = 1/\sqrt{3}$, на стр. 51 в системе уравнений (2.4) вместо уравнения $\gamma'_3 = 1 - \gamma'_1 - \gamma'_3$ должно быть $\gamma'_3 = 1 - \gamma'_1 - \gamma'_2$, на стр. 61 в табл. 2.9 вместо слова «гриппа» должно быть «группа» и т.д.

Заключение

Результаты диссертационной работы отражены в изданиях, рекомендованных ВАК, и представлены на научно-технических конференциях и семинарах международного и российского уровня.

Содержание автореферата соответствует основным положениям диссертации.

Диссертационная работа Ле Ван Кань «Повышение энергосбережения электроприводов переменного тока на базе трёхуровневых преобразователей частоты с фиксированной нейтральной точкой» представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, обладающую признаками актуальности, новизны, внутреннего единства и практической значимости.

Диссертационная работа Ле Ван Кань соответствует паспорту научной специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы.

Считаю, что представленная диссертационная работа «Повышение энергосбережения электроприводов переменного тока на базе трёхуровневых преобразователей частоты с фиксированной нейтральной точкой» соответствует всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям в соответствии с пунктами 9 –

14 «Положения о присуждении ученых степеней» в редакции постановления правительства РФ №842 от 24 сентября 2013 г., а её автор, Ле Ван Кань, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы.

Официальный оппонент –

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Электроника и Электротехника», ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»

Брованов Сергей Викторович



12.05.2025 г.

Сведения об организации:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Адрес: 630073, г. Новосибирск,
пр-т. К. Маркса, 20

Тел./факс: +7 (383) 346 08 43/ +7 (383) 346 02 09

E-mail: rector @ nstu. ru

Сайт: www.nstu.ru

ПОДПИСЬ ЗАВЕРЯЮ
Начальник отдела кадров
ФГБОУ ВО НГТУ



Брованова СВ

О. К. Пустовалова