

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный
технический университет им. Р.Е. Алексеева»



Л Т Н Лопинт

Бабанов Н.Ю.

«02» декабрь 2019 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» на диссертационную работу Рокало Даниила Юрьевича «Быстродействующий следящий электропривод переменного тока с трапециoidalным фазным напряжением», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы».

1. Актуальность темы диссертационной работы

В настоящее время следящие электроприводы переменного тока находят широкое применение в приводах подач прецизионных металлообрабатывающих станков и промышленных роботов. При этом быстродействие следящих электроприводов непосредственно влияет на динамическую точность прецизионного оборудования. Поэтому исследования, направленные на разработку быстродействующих следящих электроприводов переменного тока, несомненно, являются актуальными. Наряду с быстродействием важным показателем любого электропривода является его энергетическая эффективность, на которую влияют коммутационные потери в полупроводниковых приборах силового преобразователя. Поэтому работы, направленные на уменьшение этих потерь, также являются актуальными.

2. Оценка содержания диссертации

Рассматриваемая диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложений. Основная часть работы изложена на 122 страницах машинописного текста, иллюстрирована 56 рисунками и 15 таблицами. В приложениях приведены акты внедрения результатов научных исследований. Библиографический список содержит 90 наименований, приведенных на 10 страницах.

Во введении дано обоснование актуальности работы, сформулированы цель и задачи исследования, отражены научная новизна и практическая значимость диссертации. При этом автор выделяет необходимость разработки частотного преобразователя, формирующего трапециoidalное фазное напряжение и обеспечивающего снижение коммутационных потерь в силовых транзисторах; аналитического исследования гармонического состава выходного сигнала частотного преобразователя с трапециoidalным фазным напряжением с учетом процесса широтно-импульсной модуляции; разработки технической реализации следящего электропривода на программируемой логике; создания дискретной математической модели цифрового электропривода с учетом разных периодов дискретизации отдельных составляющих закона регулирования.

В первой главе автор рассмотрел известные структурные схемы следящих электроприводов переменного тока. Рассмотрены три основных типа построения следящих электроприводов: система векторного управления с подчиненным регулирования координат, многоконтурные системы с одной измеряемой координатой и их комбинация. Приведены данные о быстродействии известных следящих электроприводов переменного тока. Автор рассмотрел известные принципы построения частотных преобразователей, способы коммутации силовых транзисторов автономных инверторов с широтно-импульсной модуляцией и гармонический состав выходного напряжения частотных преобразователей. Проведен также обзор известных математических моделей цифровых следящих электроприводов переменного тока с учетом процесса квантования по времени.

Во второй главе автор уделил основное внимание обоснованию применения частотных преобразователей, формирующих трапецидальное фазное напряжение, в следящих электроприводах переменного тока. Для этого были найдены коэффициенты высших гармоник для выходных сигналов инверторов с $\frac{2}{3}\pi$ - и π -коммутацией силовых транзисторов. Несмотря на большие значения коэффициентов высших гармоник, следящие электроприводы с частотными преобразователями с $\frac{2}{3}\pi$ - и π -коммутацией транзисторов имеют очень высокое быстродействие. Поэтому автор проанализировал гармонический состав выходного сигнала инвертора, формирующего на статорных обмотках двигателя переменного тока трапецидальное фазное напряжение, и показал, что коэффициенты высших гармоник в таком частотном преобразователе в несколько раз меньше по сравнению с инверторами с $\frac{2}{3}\pi$ - и π -коммутацией силовых транзисторов. Это убедительно доказывает актуальность применения в следящих электроприводах переменного тока частотных преобразователей с трапецидальной формой фазного напряжения, особенно с учетом того, что в них коммутационные потери на 25 % меньше, чем в инверторах с векторными модуляторами. Автор также исследовал влияние трапецидального фазного напряжения на модуль и скорость вращения векторов напряжения и тока статора двигателя переменного тока. Полученные результаты явились дополнительными аргументами в пользу применения в следящих электроприводах частотных преобразователей, формирующих трапецидальное фазное напряжение.

Третья глава посвящена разработке частотного преобразователя, формирующего трапецидальное фазное напряжение. Приведены функциональная схема, принцип работы и законы коммутации силовых транзисторов такого инвертора. Отличительная особенность предлагаемого преобразователя заключается в том, что каждый период широтно-импульсной модуляции переключаются 3 транзистора, а при максимальной амплитуде выходного напряжения – только 2. Такой

подход позволил снизить коммутационные потери в 2 раза по сравнению с частотными преобразователями с синусоидальной модуляцией. Автор разработал защищенный патентом цифровой модулятор, осуществляющий трапецидальную широтно-импульсную модуляцию. Теоретические исследования позволили найти аналитические выражения для расчета коэффициентов высших гармоник с учетом процесса широтно-импульсной модуляции. Автор показал, что алгоритм трапецидальной модуляции влияет на гармонический состав выходного напряжения инвертора. Натурные испытания частотного преобразователя, формирующего трапецидальное фазное напряжение, подтверждают его работоспособность и результаты теоретических исследований.

В четвертой главе автор выбрал трехконтурный вариант структурного построения следящего электропривода переменного тока, методика синтеза регуляторов которого позволяет при цифровой реализации выбрать практически все параметры, кратные двум. Это явилось предпосылкой для реализации регуляторов на программируемой логической интегральной схеме. Автор разработал оригинальное техническое решение интегрального регулятора, обеспечивающее устойчивость рассматриваемого следящего электропривода переменного тока во всех возможных диапазонах изменения перемещений и скоростей. Разработана также на функциональном уровне совокупность пропорционального и пропорционально-дифференциального регуляторов и звена дифференцирования в цепи обратной связи по скорости. Отличительная особенность реализации на программируемой логике регуляторов заключается в том, что при вычислении отдельных составляющих закона регулирования можно применять разные периоды дискретизации. Поэтому автор разработал дискретную математическую модель рассматриваемого следящего электропривода переменного тока в виде дискретной передаточной функции с учетом разных периодов дискретизации. Проведена оценка адекватности полученной математической модели, которая показала, что расхождение результатов моделирования и натурных экспериментов не превышает 1,64%. Экспериментальные исследования также доказали высокое быстродействие разработан-

ного следящего электропривода переменного тока, поскольку время переходного процесса в «малом» не превышает 0,061 с.

3. Научные результаты диссертационной работы и анализ их новизны

Научную новизну диссертационной работы Рокало Д.Ю. определяют следующие основные результаты:

1. Разработан новый подход к построению частотного преобразователя с трапециoidalным фазным напряжением, обеспечивающий снижение коммутационных потерь в силовых транзисторах.

2. Получены формулы для определения гармонического состава выходного напряжения частотного преобразователя при трапециoidalной форме фазного напряжения статора с учетом процессов широтно-импульсной модуляции.

3. Разработана дискретная математическая модель цифрового следящего электропривода с учетом разных периодов дискретизации при вычислении отдельных составляющих закона регулирования.

4. Практическое значение диссертационной работы

Практическая значимость рассматриваемой диссертационной работы определяется тем, что:

1. Разработанный следящий электропривод с трапециoidalным фазным напряжением обеспечивает повышение энергетической эффективности за счет снижения коммутационных потерь и коэффициентов высших гармоник.

2. Предложенный вариант построения регуляторов и цифрового модулятора частотного преобразователя на программируемой логике значительно упрощает техническую реализацию и методику настройки быстродействующего следящего электропривода.

Следует также отметить, что частотный преобразователь с трапециoidalным фазным напряжением, разработанный Рокало Д.Ю., защищен патентом на изобретение.

5. Оценка достоверности научных положений, выводов и рекомендаций

Основные научные положения, выводы и рекомендации, представленные в диссертационной работе, получены Рокало Д.Ю. на основе методов теории элек-

тропривода, теоретических основ электротехники, электрических машин, разложения в гармонический ряд Фурье, преобразования Лапласа и z-преобразования, численного моделирования в программной среде «Matlab Simulink».

В выводах убедительно отражена научная и практическая ценность проведенных исследований при разработке быстродействующего следящего электропривода переменного тока с трапецидальным фазным напряжением.

Достоверность полученных в диссертации научных результатов подтверждается хорошим совпадением расчетов с данными натурных экспериментов.

6. Замечания по диссертации

1. Из текста диссертации не ясно, с каким типом двигателя переменного тока (синхронным или асинхронным) может работать разработанный быстродействующий следящий электропривод.
2. В диссертации не рассмотрен гармонический состав выходного напряжения частотных преобразователей с синусоидальной и векторной модуляцией.
3. По нашему мнению, частотные преобразователи, построенные по принципу «управляемый выпрямитель – автономный инвертор», будут обладать более низкими коммутационными потерями, чем инверторы с трапецидальной формой напряжения.
4. Не понятно, почему аппроксимация трапецидального фазного напряжения произведена суммой именно 307 членов ряда Фурье (стр. 74 диссертации, рисунок 3.6).
5. На осциллограмме, приведенной на рисунке 3.13 (стр. 89), амплитуда импульсов напряжения изменяется в функции скважности. По всей видимости, это отразится на фактическом гармоническом составе выходного сигнала частотного преобразователя.
6. При выводе формулы дискретной передаточной функции следящего электропривода взяты целочисленные коэффициенты m_1 и m_2 и не учитывается возможность их дробного значения.

7. В четвертой главе утверждается, что разработанный следящий электропривод переменного тока имеет высокое быстродействие, однако при этом нет сравнения с результатами, полученными другими авторами.

7. Соответствие содержания диссертации заявленной научной специальности

Оценка содержания диссертационной работы Рокало Д.Ю. проведена по паспорту научной специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»:

– **направлениями исследования** являются «... принципы и средства управления объектами, определяющие функциональные свойства действующих или создаваемых электротехнических комплексов и систем промышленного... и специального назначения»;

– **область исследования** соответствует пунктам: 1 «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, математическое... и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем», 3 «Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация...», 4 «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях»;

– **объектом исследования** «...являются электротехнические комплексы и системы ... электропривода...».

В соответствии с этим следует констатировать, что тема и содержание диссертации Рокало Д.Ю. соответствуют паспорту специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы».

8. Соответствие содержания автореферата содержанию диссертации

Автореферат диссертации Рокало Д.Ю. полностью соответствует диссертационной работе по всем квалифицируемым признакам, а именно: по цели, задачам и основным положениям, определениям актуальности, новизны и достоверности, научной и практической значимости.

9. Публикации и апробация диссертационной работы

Основные научные результаты диссертации Рокало Д.Ю. отражены в 10 публикациях, в том числе в 1 патенте РФ на изобретение, 5 статей опубликованы в рецензируемых научных журналах из Перечня, утвержденного ВАК.

Положения и результаты диссертации докладывались Рокало Д.Ю. на 4 международных научных конференциях.

Названные материалы с достаточной полнотой отражают существо рассматриваемой работы.

10. Значимость результатов рассматриваемой диссертации для науки и производства

Значимость диссертационной работы Рокало Д.Ю. для производства определяется тем, что ее результаты были использованы ЗАО «Стан-Самара» (г. Самара) при проведении проектно-конструкторских и наладочных работ, что подтверждается актом внедрения.

Значимость результатов рассматриваемой диссертации для науки определяется новыми научными знаниями, отражающими гармонический состав выходного сигнала частотных преобразователей с трапецидальной формой фазного напряжения с учетом процесса широтно-импульсной модуляции. Следует также отметить новые аналитические зависимости, полученные автором, для определения дискретной передаточной функции следящего электропривода переменного тока с учетом разных периодов дискретизации отдельных составляющих закона регулирования.

11. Заключение

Диссертационная работа Рокало Даниила Юрьевича «Быстродействующий следящий электропривод переменного тока с трапецидальным фазным напряжением», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук, полностью отвечает квалификационным признакам и принципам соответствия, которые установлены нормативным документом «Положение о порядке присуждения ученых степеней», утвержденном Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842.

Диссертация Рокало Даниила Юрьевича является законченной научно-квалификационной работой. Приведенные выше замечания не имеют принципиального характера и не снижают ценности диссертации.

В диссертационной работе представлено решение актуальной проблемы создания быстродействующего следящего электропривода переменного тока с малыми коммутационными потерями в силовых транзисторах, имеющей существенное значение в области электротехнических комплексов и системы.

Диссертация соответствует всем требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, а ее автор Рокало Даниил Юрьевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы».

Диссертация рассмотрена на заседании кафедры «Электрооборудование, электропривод и автоматика» Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева «15» ноябрь 2019 г., протокол № 2.

Заведующий кафедрой
«Электрооборудование, электропривод
и автоматика»
к.т.н., доцент



А.Б. Дарьенков

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева"

Почтовый адрес: 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24.

Телефон/факс: (831) 436-94-75.

Электронная почта: fae@nntu.ru