

**УТВЕРЖДАЮ**

Проректор по научной работе

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный  
энергетический университет имени В.И. Ленина»Д.Т. №  В.В. Тютиков

« 7 » 2022 г.

**ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» на диссертационную работу Беляевой Ольги Сергеевны «Повышение эффективности электропривода стабилизации скорости асинхронного двигателя со скалярным управлением», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы».

**1. Актуальность темы диссертационной работы**

Многие объекты требуют применения электроприводов переменного тока со скалярным управлением, например: электроприводы погружных центробежных насосов, осуществляющих механизированную добычу нефти; многодвигательные электроприводы подъемно-транспортных механизмов др. Повышение эффективности таких электроприводов является актуальной задачей, однако амплитуды высших гармоник в выходном напряжении современных частотных преобразователей могут быть значительными, что снижает коэффициент полезного действия двигателей. Поэтому разработка частотных преобразователей с улучшенным гармоническим составом выходного напряжения для повышения эффективности асинхронных двигателей является актуальным. Одновременно повышение быстродействия электроприводов со стабилизацией частоты вращения асинхронных двигателей со скалярным управлением позволяет достичь большей равномерности вращения на

малых скоростях при действии внешних возмущений, что дополнительно повышает эффективность работы.

## **2. Оценка содержания диссертации**

Рассматриваемая диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложения. Основная часть работы изложена на 139 страницах машинописного текста, иллюстрирована 64 рисунками и 11 таблицами. В приложении приведен акт внедрения результатов научных исследований. Библиографический список содержит 95 наименований на 11 страницах.

**Во введении** дано обоснование актуальности работы, сформулированы цель и задачи исследования, отражены научная новизна и практическая значимость диссертации. Автор выделяет необходимость аналитического исследования гармонического состава напряжения частотного преобразователя с учетом процесса широтно-импульсной модуляции, разработки частотного преобразователя, обеспечивающего снижение коммутационных потерь и амплитуд высших гармоник, определения уточненной линеаризованной математической модели асинхронного двигателя, разработки методики параметрического синтеза регуляторов одноконтурного электропривода стабилизации скорости со скалярным управлением.

**В первой главе** рассмотрены известные способы коммутации силовых транзисторов низковольтных частотных преобразователей и приведены данные по гармоническому составу их выходного напряжения. Произведен обзор существующих линеаризованных математических моделей асинхронного двигателя при скалярном частотном и векторном управлениях. Рассмотрены основные принципы построения электроприводов стабилизации скорости асинхронных двигателей со скалярным и векторным управлением. Проанализированы основные подходы к созданию бездатчиковых электроприводов и наблюдателей частоты вращения ротора.

**Во второй главе** проанализирован закон коммутации силовых транзисторов частотного преобразователя при использовании традиционной синусоидальной модуляции. Получены аналитические выражения для определения гармонического

состава и действующего значения выходного напряжения при данном способе модуляции. Разработан способ коммутации силовых транзисторов частотного преобразователя с синусоидальной модуляцией, обеспечивающий снижение коммутационных потерь и суммарный коэффициент высших гармоник. Найдены аналитические зависимости для определения гармонического состава и действующего значения первой гармоники выходного напряжения при предложенном способе коммутации транзисторов. Предложено техническое решение, реализующее предложенный способ коммутации силовых транзисторов, в виде цифрового модулятора.

**Третья глава** посвящена разработке уточненной линеаризованной математической модели асинхронного двигателя при скалярном частотном управлении. Получены передаточные функции двигателя по отношению к основным управляющим и возмущающим воздействиям, отличающиеся сложной взаимосвязью параметров схемы замещения и начальных условий. Методом компьютерного моделирования произведена оценка адекватности передаточных функций, которая показала, что максимальное расхождение с результатами, полученными по исходной нелинейной модели не превышает 6,1%.

**В четвертой главе** разработана методика параметрического синтеза регулятора одноконтурного электропривода стабилизации скорости со скалярным управлением на основе полюсов и нулей уточненной передаточной функции. Предложена техническая реализация одноконтурного электропривода с помощью технологического ПИД-регулятора скорости, имеющемуся практически в любом современном частотном преобразователе. Получены формулы для расчета коэффициента передачи и постоянных времени такого регулятора, обеспечивающие монотонный характер переходного процесса. Произведена оценка эффективности разработанной методики синтеза параметров регулятора, которая показала возможность создания быстродействующего электропривода стабилизации скорости асинхронного двигателя со временем переходного процесса 0,044 с. Рассмотрен вопрос скалярного управления асинхронным двигателем без датчика скорости. Приведены результаты натурных экспериментов, которые доказали адекватность проведенных теоретических исследований.

### **3. Научные результаты диссертационной работы и анализ их новизны**

Научную новизну диссертационной работы Беляевой О.С. определяют следующие основные результаты:

1. Новый способ коммутации силовых транзисторов низковольтного частотного преобразователя с синусоидальной широтно-импульсной модуляцией, отличающийся от известных последовательностью рабочих состояний транзисторов и обеспечивающий снижение коммутационных потерь при переключении транзисторов и амплитуд высших гармоник в выходном напряжении.

2. Аналитическое выражение для определения гармонического состава напряжения на выходе частотного преобразователя, обеспечивающего синусоидальную широтно-импульсную модуляцию с учётом нового способа коммутации силовых транзисторов.

3. Уточненная математическая модель асинхронного двигателя при скалярном управлении, отличающаяся видом передаточных, связывающих изменение скорости вращения полтора двигателя с вариацией частоты и действующего значения питающего напряжения и изменением момента нагрузки.

4. Методика параметрического синтеза регулятора, учитывающая нули и полюса уточненной передаточной функции асинхронного двигателя и обеспечивающая повышение быстродействия одноконтурного электропривода стабилизации скорости со скалярным управлением.

### **4. Практическое значение диссертационной работы**

Практическая значимость рассматриваемой диссертационной работы определяется тем, что:

1. Разработанный способ коммутации силовых транзисторов и цифровой модулятор, реализующий этот способ, повышают энергетическую эффективность частотного преобразователя, обеспечивающего синусоидальную модуляцию, за счет снижения коммутационных потерь и амплитуд высших гармоник в выходном напряжении.

2. Предложенная методика параметрического синтеза регулятора проста в инженерном применении и позволяет производить настройку одноконтурного электропривода переменного тока со скалярным управлением асинхронным двигателем, которая обеспечивает высокое быстродействие при обработке управляющих и возмущающего воздействий.

Основные технические решения, представленные в диссертации О.С. Беляевой, защищены патентом на изобретение.

## **5. Оценка достоверности научных положений, выводов и рекомендаций**

Основные научные положения, выводы и рекомендации, представленные в диссертационной работе, получены Беляевой О.С. на основе методов теории электропривода, электрических машин, разложения в гармонический ряд Фурье, линеаризации нелинейных дифференциальных уравнений, численного моделирования в программной среде «Matlab Simulink».

Выводы, сформулированные Беляевой О.С. по диссертационной работе, структурированы в соответствии с содержанием работы. В них убедительно отражена научная и практическая ценность проведенных исследований по повышению эффективности электропривода стабилизации скорости асинхронного двигателя со скалярным управлением.

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 чем связан выбор угла, определяющего «мертвое» время при переключениях транзисторов каждого полумоста при традиционной синусоидальной модуляции, величиной  $\theta_{dt} = \frac{\theta_1}{16}$ .

2. Разработанный способ коммутации силовых транзисторов, обеспечивающий снижение коммутационных потерь и амплитуд высших гармоник, не может

быть реализован на серийно выпускаемых микроконтроллерах, предназначенных для реализации частотно регулируемых электроприводов.

3. Как отмечено на стр. 66 диссертации, формула (2.17) для расчета амплитуд первой и высших гармоник справедлива только при частоте 50 Гц и максимальном напряжении и не может применяться при других частотах выходного напряжения частотного преобразователя, реализующего новый способ коммутации силовых транзисторов.

4. Численные значения коэффициентов передаточных функций (3.28), (3.30) и (3.31) при старшей степени  $p$  равны  $8,594 \cdot 10^{-33} \text{ с}^{15}$ . В связи с этим, наверное, такими значениями можно было бы пренебречь и уменьшить порядок уточненных передаточных функций.

5. Недостаток уточненной математической модели асинхронного двигателя, полученной в диссертации, заключается в том, что она требует не только знания параметров T-образной схемы замещения, но и моделирования на компьютере нелинейной модели для нахождения начальных условий.

6. Не понятно, по какому критерию в методике синтеза параметров регулятора одноконтурного электропривода со скалярным управлением производится учет разности постоянных времени числителя и знаменателя передаточной функции асинхронного двигателя, представленный в формуле (4.5).

7. При расчете погрешности предложенного наблюдателя скорости, приведенной в таблице 4.4, не указано, что берется в качестве истинного значения скорости.

## **7. Соответствие содержания диссертации заявленной научной специальности**

Оценка содержания диссертационной работы Беляевой О.С. 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 Беляевой О.С. соответствуют паспорту специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы».

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

Автореферат диссертации Беляевой О.С. 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 Беляевой О.С. отражены в 7 публикациях, в том числе в 1 патенте РФ на изобретения, 3 статьях, опубликованных в рецензируемых научных журналах из Перечня, утвержденного ВАК.

Положения и результаты диссертации докладывались Беляевой О.С. на 1 международной и 2 всероссийской научных конференциях.

Названные материалы с достаточной полнотой отражают существо рассматриваемой работы.

## **10. Значимость результатов рассматриваемой диссертации для науки и производства**

Значимость диссертационной работы Беляевой О.С. для производства определяется тем, что ее результаты были использованы ЗАО «Стан-Самара» (г. Самара) в проектно-конструкторской работе при расчете амплитуд высших гармоник в выходных сигналах применяемых частотных преобразователей, что подтверждается актом внедрения.

Значимость результатов рассматриваемой диссертации для науки определяется новыми научными знаниями, отражающими гармонический состав выходного сигнала частотных преобразователей с синусоидальной широтно-импульсной модуляцией, отличающийся новым способом коммутации милых транзисторов. Следует также полученную автором уточненную математическую модель асинхронного двигателя при скалярным частотном управлении, отличающуюся видом передаточных функций по управляющим и возмущающему воздействию, которые применяются для определения настроек регулятора электропривода стабилизации скорости.

## **11. Заключение**

Диссертационная работа Беляевой Ольги Сергеевны «Повышение эффективности электропривода стабилизации скорости асинхронного двигателя со скалярным управлением», 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 Беляевой Ольги Сергеевны является законченной научно-квалификационной работой. Приведенные выше замечания не имеют принципиального характера и не снижают ценности диссертации.

В диссертационной работе представлено решение актуальной проблемы повышения эффективности электропривода стабилизации скорости асинхронного

двигателя со скалярным управлением, имеющей существенное значение в области электротехнических комплексов и системы.

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

Диссертация, автореферат диссертации и отзыв ведущей организации обсуждены на заседании кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», протокол № 9 от 11 мая 2022 г.

**Сведения о ведущей организации:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина».

Адрес: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34

Тел.: +7 (4932) 269706 факс: +7 (4932) 385-701

Электронная почта: office@ispu.ru coolenko@drive.ispu.ru

Сайт: <http://ispu.ru/>.

Заведующий кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» (ЭПиАПУ) Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

к.т.н., доцент



Куленко Михаил Сергеевич

Подпись заведующего кафедрой ЭПиАПУ Куленко М.С. заверяю:

Ученый секретарь ученого Совета ИГЭУ

«11» мая

2022



Юлия Вадимовна Вылгина