

На правах рукописи

Беляева Ольга Сергеевна

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА
СТАБИЛИЗАЦИИ СКОРОСТИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ
СО СКАЛЯРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ**

Специальность: 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара – 2022

Работа выполнена на кафедре «Электропривод и промышленная автоматика» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет».

Научный руководитель: **Стариков Александр Владимирович**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», заведующий кафедрой «Электропривод и промышленная автоматика»

Официальные оппоненты: **Артюхов Иван Иванович**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», профессор кафедры «Электроэнергетика и электротехника»

Доманов Виктор Иванович
кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет», заведующий кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок»

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», г. Иваново

Защита диссертации состоится 07 июня 2022 в 13⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.217.04 при ФГБОУ ВО «СамГТУ» по адресу: г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Главный корпус, ауд. № 200.

С авторефератом и диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «СамГТУ», а также на официальном сайте диссертационного совета по адресу <http://d21221704.samgtu.ru>.

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенных печатью) просим направлять по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская 244, Главный корпус, Самарский государственный технический университет, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.217.04; факс: (846) 278-44-00, e-mail: a-ezhova@yandex.ru.

Автореферат разослан «_____» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.217.04



Е.В. Стрижакова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена разработке электропривода стабилизации скорости асинхронного двигателя со скалярным управлением, отличающегося повышенными показателями энергетической и технической эффективности.

Актуальность работы

Электроприводы переменного тока находят применение практически во всех отраслях промышленности. При этом регулирование скорости с требуемой точностью является одной из приоритетных задач. Современные регулируемые электроприводы с асинхронными исполнительными двигателями, обладающие большим диапазоном регулирования скорости, в подавляющем большинстве случаев представляют собой системы векторного управления. Однако, существуют области применения, где необходимо скалярное управление асинхронным двигателем. К ним относятся многодвигательные приводы слипов подъемно-спусковых механизмов, ленточных конвейеров, аппаратов воздушного охлаждения масла и газа, электроприводы погружных центробежных насосов, осуществляющие механизированную добычу нефти. При этом следует отметить, что повышение быстродействия таких электроприводов улучшает качество и эффективность работы рассматриваемых установок. Поэтому развитие теории и практики электроприводов стабилизации скорости асинхронных двигателей со скалярным управлением, позволяющее повысить их быстродействие является актуальной задачей.

Очень важную роль в современном мире играет энергетическая эффективность электропривода переменного тока, которая определяется коэффициентами полезного действия частотного преобразователя и двигателя. Поэтому работы, направленные на снижение потерь в этих элементах электропривода и, как следствие, повышение их коэффициентов полезного действия, также являются актуальными.

Степень разработанности проблемы

Электроприводам переменного тока со скалярным и векторным управлением уделено большое внимание российских и иностранных ученых. Такие известные ученые, как А.С. Анучин, И.Я. Браславский, А.А. Булгаков, А.Б. Виноградов, В.И. Доманов, Ю.Н. Калачев, С.А. Ковчин, В.Ф. Козаченко, А.Е. Козярук, В.Г. Макаров, В.Н. Мещеряков, О.П. Михайлов, Г.Б. Онищенко, О.И. Осипов, Л.П. Петров, А.Д. Поздеев, В.В. Рудаков, Ю.А. Сабинин, Г.Г. Соколовский, В.М. Терехов, F. Blaschke, G.S. Vuja, C Busca, K. Hasse, M.P. Kazmierkowski посвятили свои исследования электроприводам стабилизации скорости синхронных и асинхронных двигателей. Однако, основное внимание в этих работах уделено различным модификациям векторного управления, нелинейным математическим моделям асинхронных и синхронных двигателей, частотным преобразователям с традиционной синусоидальной и векторной модуляцией.

Отдельно следует отметить работы С.Я. Галицкова, К.С. Галицкова, С.Л. Лисина, Д.Н. Джабасовой и Д.И. Рокало, в которых рассматриваются новые подходы к скалярному управлению двигателями переменного тока, повышающие быстродействие электроприводов, линеаризованные математические модели асинхронных и синхронных двигателей, а также принципы построения частотных преобразователей, снижающие коммутационные потери в силовых транзисторах и коэффициенты высших гармоник в выходном напряжении.

Однако, в приведенных выше работах не рассматривается методика параметрического синтеза регулятора для одноконтурного электропривода стабилизации скорости асинхронного двигателя со скалярным управлением, который можно реализовать с помощью так называемого технологического регулятора, имеющегося в составе любого современного частотного преобразователя. Кроме того, известные линеаризованные математические модели асинхронного двигателя при частотном управлении в виде передаточных функций имеют большие погрешности, поскольку были получены с помощью упрощенных методов линеаризации. Следует также отметить, что современные низковольтные частотные преобразователи с традиционной синусоидальной модуляцией имеют большие

амплитуды высших гармоник в выходном напряжении, вызванные введением «мертвого» времени при переключении силовых транзисторов, и большие коммутационные потери.

С учетом степени разработанности проблемы сформулированы цели и задачи диссертационной работы.

Цель диссертационной работы – повышение эффективности электропривода стабилизации скорости асинхронного двигателя со скалярным управлением.

Задачи диссертационного исследования:

1. Разработка частотного преобразователя, обеспечивающего синусоидальную широтно-импульсную модуляцию, снижение коммутационных потерь и амплитуд высших гармоник в выходном напряжении.

2. Аналитическое исследование гармонического состава выходного сигнала разработанного частотного преобразователя с учетом процесса широтно-импульсной модуляции.

3. Разработка уточненной линеаризованной математической модели асинхронного двигателя при скалярном частотном управлении.

4. Разработка методики параметрического синтеза регулятора, обеспечивающей повышение быстродействия одноконтурного электропривода стабилизации скорости асинхронного двигателя со скалярным управлением.

5. Проведение вычислительных и натурных экспериментов, подтверждающих адекватность теоретических исследований.

Объектом исследования является регулируемый электропривод переменного тока.

Предмет исследования – электропривод стабилизации скорости асинхронного двигателя со скалярным управлением и частотный преобразователь с синусоидальной широтно-импульсной модуляцией.

Методы решения

В работе использовались методы теории электропривода, электрических машин, разложения в гармонический ряд Фурье, линеаризации нелинейных дифференциальных уравнений и численного моделирования.

Научная новизна

1. Разработан способ коммутации силовых транзисторов низковольтного частотного преобразователя, обеспечивающий синусоидальную широтно-импульсную модуляцию, снижение коммутационных потерь и амплитуд высших гармоник в выходном напряжении и отличающийся последовательностью рабочих состояний транзисторов.

2. Получено аналитическое выражение для определения гармонического состава выходного напряжения частотного преобразователя при синусоидальной широтно-импульсной модуляции, отличающееся учетом нового способа коммутации силовых транзисторов.

3. Разработана уточненная линеаризованная математическая модель асинхронного двигателя при скалярном частотном управлении, отличающаяся видом передаточных функций по управляющим и возмущающему воздействиям.

4. Разработана методика параметрического синтеза регулятора, обеспечивающая повышение быстродействия одноконтурного электропривода стабилизации скорости асинхронного двигателя со скалярным управлением, отличающаяся учетом полюсов и нулей уточненной передаточной функции двигателя.

Практическая значимость результатов работы

1. Разработанный способ коммутации силовых транзисторов частотного преобразователя обеспечивает повышение энергетической эффективности электропривода стабилизации скорости асинхронного двигателя за счет снижения коммутационных потерь и коэффициентов высших гармоник при синусоидальной широтно-импульсной модуляции.

2. Предложенная методика расчета параметров регулятора позволяет производить настройку одноконтурного электропривода стабилизации скорости асинхронного двигателя со скалярным управлением, обеспечивающую высокое быстродействие при обработке управляющих и возмущающих воздействий.

Достоверность полученных результатов подтверждается хорошим совпадением расчетов с данными компьютерного моделирования и натуральных экспериментов.

Реализация результатов работы

Основные результаты работы были использованы в ЗАО «Стан-Самара» (г. Самара) при расчете амплитуд высших гармоник в выходных сигналах применяемых частотных преобразователей.

Апробация работы

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на Всероссийской научно-практической конференции «Ашировские чтения» (г. Самара, 2019), Всероссийской научно-практической конференции «Ашировские чтения» (г. Самара, 2021) и Международной научной-технической конференции по промышленному инжинирингу и современным технологиям «FarEastCon-2021» (г. Владивосток, 2021).

Публикации

По теме диссертации опубликованы 7 печатных работ общим объемом 4,12 п.л., в том числе 3 статьи в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях из перечня ВАК РФ и 1 патент на изобретение.

Личный вклад автора состоит в разработке нового способа коммутации силовых транзисторов частотного преобразователя и цифрового модулятора, реализующего этот способ; в получении аналитических выражений для определения амплитуд высших гармоник в выходном напряжении инвертора с традиционной синусоидальной широтно-импульсной и с новым способом коммутации силовых транзисторов; в получении уточненных передаточных функций асинхронного двигателя; в разработке методики параметрического синтеза регулятора одноконтурного электропривода стабилизации скорости асинхронного двигателя со скалярным управлением; в проведении вычислительных и натуральных экспериментов.

На защиту выносятся

1. Способ коммутации силовых транзисторов низковольтного частотного преобразователя, обеспечивающий синусоидальную широтно-импульсную модуляцию, снижение коммутационных потерь и амплитуд высших гармоник в выходном напряжении.

2. Результаты аналитического исследования гармонического состава выходного напряжения частотного преобразователя с традиционной синусоидальной модуляцией и с новым способом коммутации силовых транзисторов.

3. Уточненная линеаризованная модель асинхронного двигателя при скалярном частотном управлении.

4. Методика расчета параметров регулятора одноконтурного электропривода стабилизации скорости асинхронного двигателя со скалярным управлением.

5. Результаты вычислительных и натурных экспериментов.

Научная квалификационная работа на соискание степени кандидата технических наук выполнена в соответствии с паспортом специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы» и соответствует формуле специальности: «... принципы и средства управления объектами, определяющие функциональные свойства действующих или создаваемых электротехнических комплексов и систем промышленного... и специального назначения».

Объектом изучения: «...являются электротехнические комплексы и системы ... электропривода».

Область исследования соответствует пунктам 1, 3 и 4 паспорта специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы».

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложения. Основная часть работы изложена на 142 страницах машинописного текста, иллюстрирована 64 рисунками и 11 таблицами. Библиографический список содержит 95 наименований на 12 страницах.

Содержание работы

Во введении дано обоснование актуальности темы исследования, посвященного повышению эффективности электропривода стабилизации скорости асинхронного двигателя со скалярным управлением, сформулированы цель и задачи работы, определена научная новизна и практическая значимость диссертации.

В первой главе проведен обзор существующих способов коммутации силовых транзисторов низковольтных частотных преобразователей, гармонического состава и максимального действующего значения выходного напряжения инверторов их использующих. Рассмотрены известные линеаризованные математические модели асинхронного двигателя при скалярном и векторном управлении. Проведен обзор принципов построения электроприводов стабилизации скорости асинхронных двигателей и методик синтеза регуляторов. Рассмотрены основные подходы к созданию бездатчиковых систем электроприводов, использующих наблюдатели скорости.

Во второй главе рассмотрен закон коммутации силовых транзисторов частотного преобразователя, обеспечивающий традиционную синусоидальную модуляцию. Найдены аналитические зависимости, позволяющие определить амплитуды высших гармоник при традиционной синусоидальной модуляции с учетом и без учета введения «мертвого» времени на переключения транзисторов каждого полумоста. Показано, что введение «мертвого» времени в 81 раз увеличивает суммарный коэффициент гармонических составляющих в выходном напряжении частотного преобразователя.

Разработан способ коммутации силовых транзисторов инвертора, обеспечивающий синусоидальную модуляцию и не требующий введения «мертвого» времени. Для его реализации предлагается следующие режимы функционирования транзисторов (таблица 1) частотного преобразователя, упрощенная силовая схема которого приведена на рисунке 1.

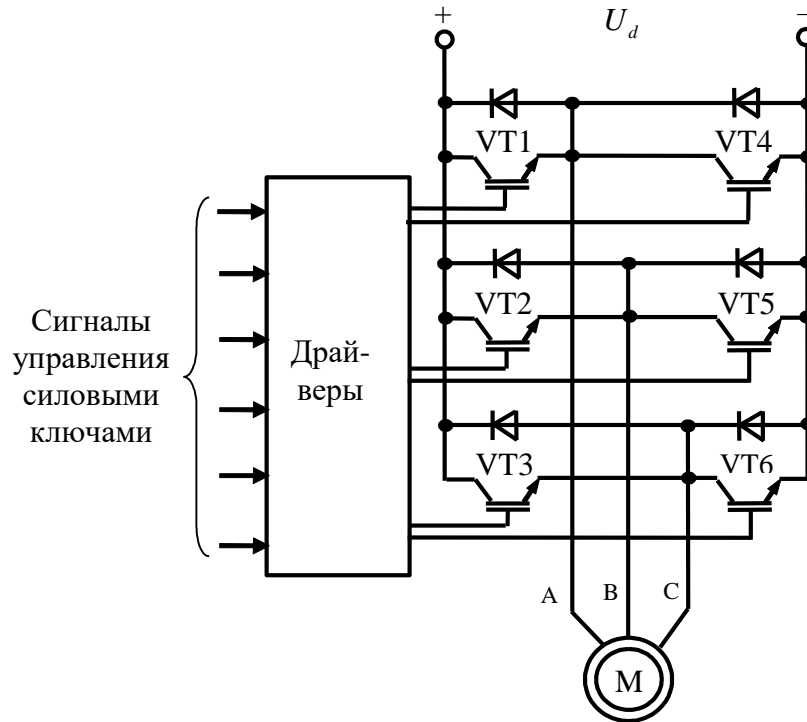


Рисунок 1 – Упрощенная силовая схема частотного преобразователя

Таблица 1 – Предлагаемые режимы функционирования силовых ключей

θ , рад	$0 - \pi/3$	$\pi/3 - 2\pi/3$	$2\pi/3 - \pi$	$\pi - 4\pi/3$	$4\pi/3 - 5\pi/3$	$5\pi/3 - \pi$
Режим VT1	γ_A	γ_A	γ_A	Выкл.	Выкл.	Выкл.
Режим VT2	Выкл.	Выкл.	$\gamma_B = \gamma_C - \gamma_A $	γ_B	γ_B	Выкл.
Режим VT3	$\gamma_C = \gamma_B - \gamma_A $	Выкл.	Выкл.	Выкл.	$\gamma_C = \gamma_A - \gamma_B $	γ_C
Режим VT4	Выкл.	Выкл.	Выкл.	γ_A	γ_A	γ_A
Режим VT5	γ_B	γ_B	Выкл.	Выкл.	Выкл.	$\gamma_B = \gamma_C - \gamma_A $
Режим VT6	Выкл.	$\gamma_C = \gamma_A - \gamma_B $	γ_C	$\gamma_C = \gamma_B - \gamma_A $	Выкл.	Выкл.

Период выходного напряжения делится на 6 частей длительностью $\frac{\pi}{3}$.

Предлагается на участках углов $0 < \theta \leq \frac{2\pi}{3}$ и $\pi < \theta \leq \frac{5\pi}{3}$ временные интервалы открытых состояний транзисторов, подключенных к соответствующим фазам асинхронного двигателя, вычислять по формулам

$$\left. \begin{aligned} \tau_A &= |N_U T_{ШИМ} \sin \theta|; \\ \tau_B &= \left| N_U T_{ШИМ} \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \right|; \\ \tau_C &= |\tau_B - \tau_A|, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

а при углах $\frac{2\pi}{3} < \theta \leq \pi$ и $\frac{5\pi}{3} < \theta \leq 2\pi$ по выражениям

$$\left. \begin{aligned} \tau_A &= |N_U T_{ШИМ} \sin \theta|; \\ \tau_C &= \left| N_U T_{ШИМ} \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right|; \\ \tau_B &= |\tau_C - \tau_A|. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Формулы (1) и (2) определяют скважности открытого состояния силовых транзисторов

$$\gamma_A = \frac{\tau_A}{T_{ШИМ}}, \quad \gamma_B = \frac{\tau_B}{T_{ШИМ}}, \quad \gamma_C = \frac{\tau_C}{T_{ШИМ}},$$

где $T_{ШИМ} = \frac{1}{f_{ШИМ}}$ – период, а $f_{ШИМ}$ – частота широтно-импульсной модуляции.

При предлагаемом способе коммутации силовых транзисторов фазное напряжение, формируемое с помощью широтно-импульсной модуляции, будет представлять кусочно-постоянную функцию $f(\theta)$, принимающую значения 0 и $\frac{1}{2}U_d$. Максимальное действующее значение фазного напряжения в этом случае будет определяться формулой

$$U_{rms.max}^{s2} = \frac{U_d}{2} \sqrt{\frac{1}{v} \sum_h^{v-1} \sin^2(h\theta_1)}, \quad (3)$$

где $v = \frac{f_{ШИМ}}{2f_1}$; f_1 – частота выходного напряжения инвертора; $\theta_1 = \frac{2\pi f_1}{f_{ШИМ}}$.

Подсчет по формуле (3) при $f_1 = 50$ Гц, $f_{ШИМ} = 4,8$ кГц и $U_d = 515$ В показывает, что максимальная величина действующего значения фазного напряжения, которая может быть получена при предлагаемом способе коммутации силовых транзисторов, составляет $U_{rms.max}^{s2} = 215$ В.

Найдена аналитическая зависимость для расчета амплитуд первой и высших гармоник в выходном напряжении частотного преобразователя, использующего предложенный способ коммутации силовых транзисторов

$$b_n = -\frac{U_d}{n\pi} \sum_{h=1}^{v-1} \left\{ \cos \left[n\theta_1 \left(h + \sin(h\theta_1) \right) \right] - \cos(nh\theta_1) \right\}. \quad (4)$$

Следует отметить, что формула (4) справедлива именно для $f_1 = 50$ Гц, $f_{ШИМ} = 4,8$ кГц, $v = 48$ и $U_1 = U_{1\max}$. Методом компьютерного моделирования доказана адекватность полученных формул и показано, что предлагаемый способ коммутации позволяет снизить суммарный коэффициент гармонических составляющих в 48 раз и повысить действующее значение первой гармоники выходного напряжения на 7,7% по сравнению с частотными преобразователями с традиционной синусоидальной модуляцией.

Разработан цифровой модулятор, реализующий предложенный способ коммутации силовых транзисторов инвертора (рисунок 2).

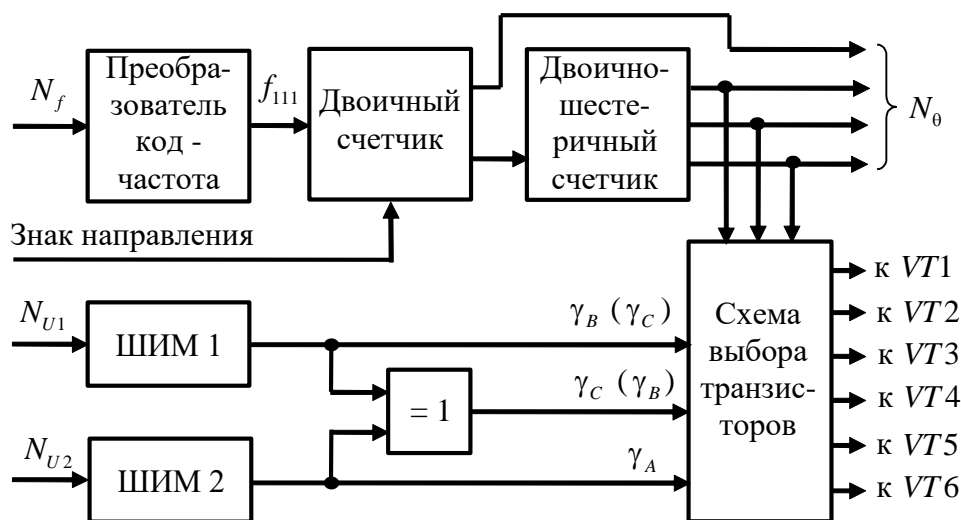


Рисунок 2 – Упрощенная функциональная схема цифрового модулятора, обеспечивающего новый способ коммутации силовых транзисторов частотного преобразователя

В состав цифрового модулятора входят следующие блоки: преобразователь код – частота, двоичный и двоично-шестеричный счетчики, два широтно-импульсных модулятора (ШИМ), элемент ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ (=1) и схема выбора

транзисторов. Следует обратить внимание на тот факт, что для реализации разработанного способа коммутации силовых транзисторов частотного преобразователя достаточно двух широтно-импульсных модуляторов, которые будут формировать длительности импульсов τ_A и τ_B или τ_A и τ_C , рассчитанные по формулам (1) или (2). Длительность же третьего импульса формируется с помощью элемента ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ.

Входными воздействиями предлагаемого модулятора являются знак направления вращения двигателя переменного тока (порядка чередования фаз), цифровой код N_f , определяющий требуемую частоту выходного напряжения инвертора, и цифровые коды N_{U1} и N_{U2} , которые рассчитываются исходя из требуемой амплитуды напряжения и цифрового кода N_θ .

В третьей главе рассмотрены нелинейные уравнения движения асинхронного двигателя при скалярном частотном управлении. В процессе линеаризации получена линеаризованная система уравнений движения асинхронного двигателя со скалярным частотным управлением

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\psi_{1x}}{dt} &= U_{1x} - \frac{R_1 L_2'}{\Delta} \psi_{1x} + \frac{R_1 L_0}{\Delta} \psi_{2x} + \frac{2\pi}{Z_n} (\psi_{1y0} f_1 + f_{10} \psi_{1y}); \\ \frac{d\psi_{1y}}{dt} &= U_{1y} - \frac{R_1 L_2'}{\Delta} \psi_{1y} + \frac{R_1 L_0}{\Delta} \psi_{2y} - \frac{2\pi}{Z_n} (\psi_{1x0} f_1 + f_{10} \psi_{1x}); \\ \frac{d\psi_{2x}}{dt} &= -\frac{R_2' L_1}{\Delta} \psi_{2x} + \frac{R_2' L_0}{\Delta} \psi_{1x} + \frac{2\pi}{Z_n} (\psi_{2y0} f_1 + f_{10} \psi_{2y}) - (\psi_{2y0} \omega + \omega_{00} \psi_{2y}); \\ \frac{d\psi_{2y}}{dt} &= -\frac{R_2' L_1}{\Delta} \psi_{2y} + \frac{R_2' L_0}{\Delta} \psi_{1y} - \frac{2\pi}{Z_n} (\psi_{2x0} f_1 + f_{10} \psi_{2x}) + (\psi_{2x0} \omega + \omega_{00} \psi_{2x}); \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{m_1 Z_n L_0}{2 J_{np} \Delta} (\psi_{2x0} \psi_{1y} + \psi_{1y0} \psi_{2x} - \psi_{2y0} \psi_{1x} - \psi_{1x0} \psi_{2y}) - \frac{1}{J_{np}} M_c; \\ \omega_0 &= \frac{2\pi f_1}{Z_n}; U_{1x} = U_{1y} = k_{U1} f_1 + U_0, \end{aligned} \right\} (5)$$

где ψ_{1x} и ψ_{1y} – проекции вектора потокосцепления статора в ортогональной системе координат Oxy , вращающейся со скоростью магнитного поля; U_{1x} и U_{1y} – проекции изображающего вектора напряжения; ψ_{2x} и ψ_{2y} – соответствующие

проекции вектора потокосцепления ротора; L_1 и R_1 – индуктивность и активное сопротивление цепи статора; L'_2 и R'_2 – приведенные индуктивность и активное сопротивление цепи ротора; L_0 – взаимная индуктивность; ω_0 – угловая скорость вращения магнитного поля; ω – угловая частота вращения ротора; J_{np} – приведенный момент инерции ротора; m_1 – число фаз электродвигателя; Z_n – число пар полюсов; M_c – момент сопротивления на валу электродвигателя; $\Delta = L_1 L'_2 - L_0^2$; f_1 – частота питающего напряжения; k_{U1} – коэффициент пропорциональности, U_0 – напряжение при нулевой частоте; Ψ_{1x0} , Ψ_{1y0} , Ψ_{2x0} , Ψ_{2y0} , ω_{00} и f_{10} – начальные условия; t – время.

Системе уравнений (5) соответствует линеаризованная структурная схема асинхронного двигателя как объекта управления (рисунок 3). Ее отличительной чертой является наличие большого количества перекрестных связей, что затрудняет использование метода структурных преобразований для нахождения передаточных функции асинхронного двигателя при скалярном частотном управлении. Поэтому применен метод последовательного исключения переменных из системы уравнений (5) и найдена передаточная функция асинхронного двигателя по отношению к изменению частоты питающего напряжения, которые имеют характеристический полином пятнадцатого порядка

$$W_{\omega}^{f_1}(p) = \frac{\omega(p)}{f_1(p)} = \frac{k_{\omega}^{f_1} (b_0 p^{13} + b_1 p^{12} + b_2 p^{11} + b_3 p^{10} + b_4 p^9 + b_5 p^8 + b_6 p^7 + b_7 p^6 + b_8 p^5 + b_9 p^4 + b_{10} p^3 + b_{11} p^2 + b_{12} p + 1)}{a_0 p^{15} + a_1 p^{14} + a_2 p^{13} + a_3 p^{12} + a_4 p^{11} + a_5 p^{10} + a_6 p^9 + a_7 p^8 + a_8 p^7 + a_9 p^6 + a_{10} p^5 + a_{11} p^4 + a_{12} p^3 + a_{13} p^2 + a_{14} p + 1}, \quad (6)$$

где p – комплексная переменная; $k_{\omega}^{f_1}$, $b_0 - b_{12}$, $a_0 - a_{14}$ – коэффициенты, значения которых зависят от параметров схемы замещения двигателя и начальных условий.

Определены также передаточные функции асинхронного двигателя по отношению к изменению действующего значения напряжения статора и вариации момента нагрузки.

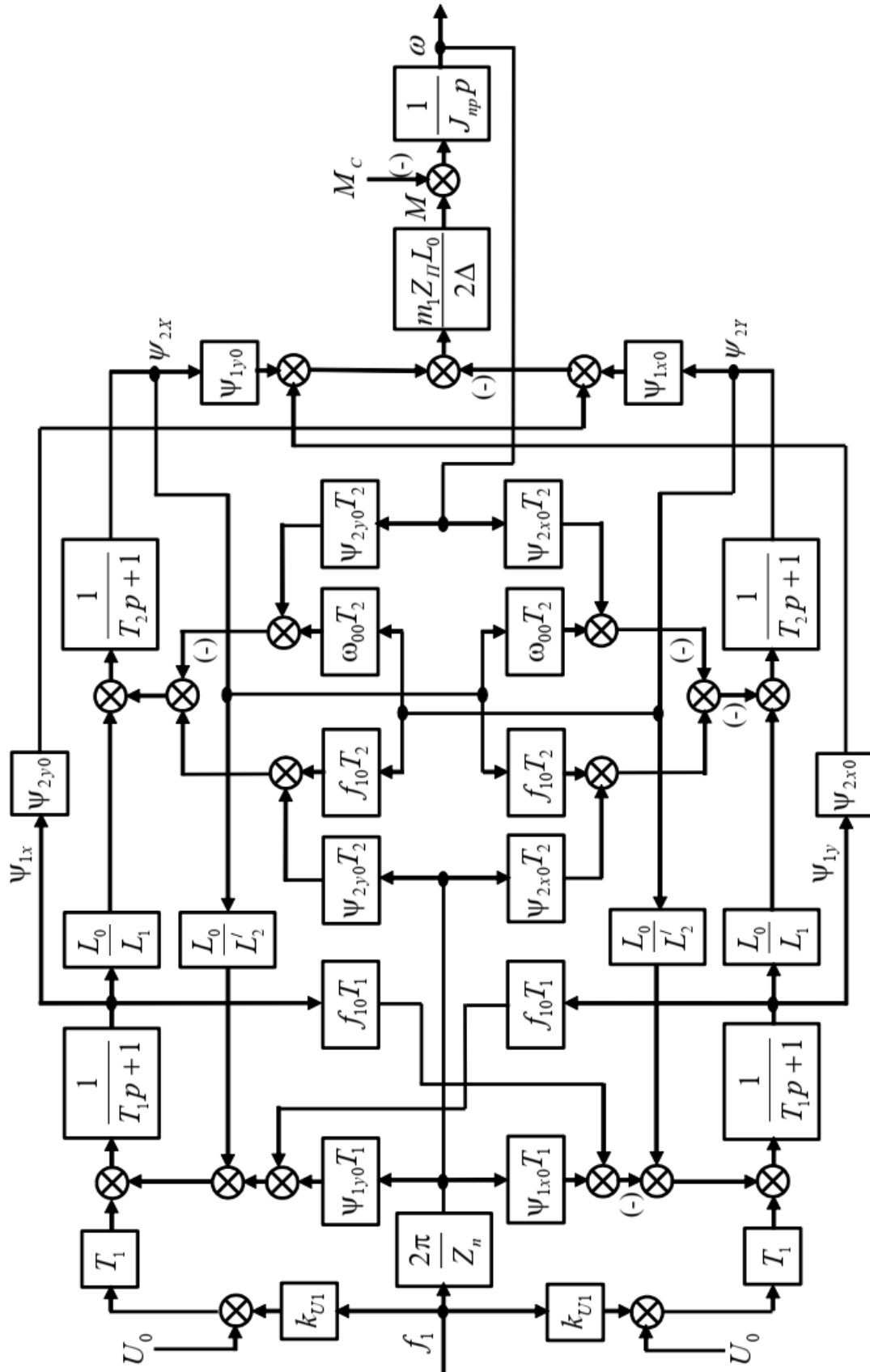


Рисунок 3 – Линеаризованная структурная схема асинхронного двигателя как объекта управления

Найдены численные значения полученных передаточных функций для асинхронного двигателя 1LA7060-4AB10-Z для различных начальных условий,

соответствующих частотам питающего напряжения 50 Гц и 1 Гц. Проведено компьютерное моделирование рассматриваемого асинхронного двигателя и построены графики переходных процессов с помощью полученных передаточных функций и нелинейной модели. Например, сравнение графика переходного процесса по управляющему воздействию f_1 , построенного по передаточной функции (6), рассчитанной для начальной частоты 1 Гц (рисунок 4), с аналогичным графиком, полученным по нелинейной системе уравнений (рисунок 5), показывает их хорошее совпадение.

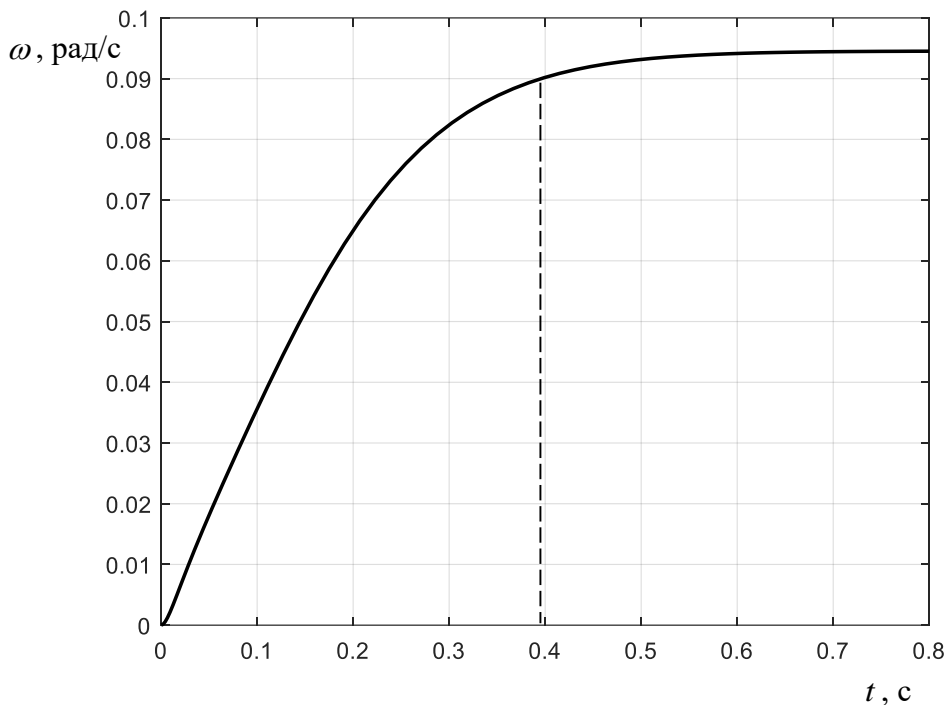


Рисунок 4 – Переходный процесс в асинхронном двигателе 1LA7060-4AB10-Z при начальной частоте $f_{10} = 1$ Гц, построенный по передаточной функции (6)

Расхождение результатов по времени переходного процесса составляет 5,41%, а по перерегулированию – 0%. Сравнение графиков, построенных по другим полученным передаточным функциям показало, что максимальное расхождение результатов с нелинейной моделью не превышает 6,1%. Это позволило сделать вывод об адекватности полученных уточненных передаточных функций асинхронного двигателя при скалярном частотном управлении.

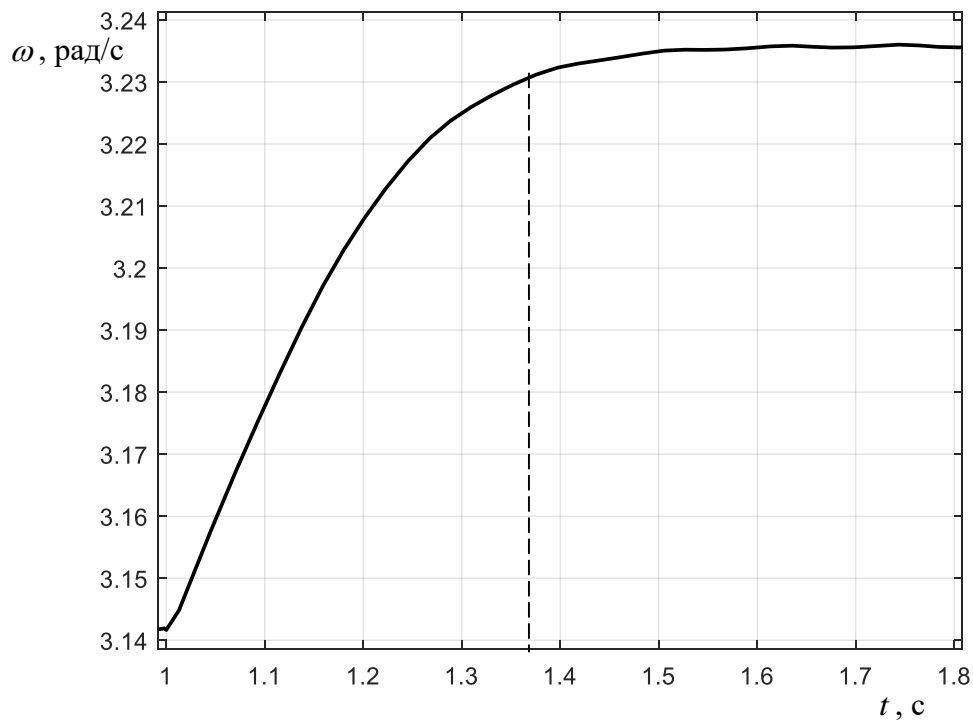


Рисунок 5 – Переходный процесс в асинхронном 1LA7060-4AB10-Z при начальной частоте $f_{10} = 1$ Гц, построенный по нелинейной системе уравнений

В четвертой главе рассмотрен одноконтурный электропривод стабилизации скорости асинхронного двигателя со скалярным управлением, который можно реализовать на любом современном частотном преобразователе с помощью технологического пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора $W_{PC}(p)$ (рисунок 6). На основе анализа полюсов и нулей уточненной передаточной функции асинхронного двигателя разработана методика расчета параметров настройки этого регулятора.

Она содержит следующую последовательность действий:

1. Расчет по известным методикам параметров Т-образной схемы замещения асинхронного двигателя.
2. Моделирование в программе Matlab Simulink выбранного асинхронного двигателя на частоте питающего напряжения 1 Гц и определение установившихся значения проекций потокоцеплений статора и ротора.

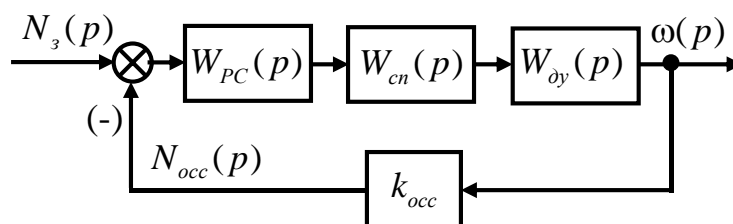


Рисунок 6 – Структурная схема непрерывного прототипа одноконтурного электропривода стабилизации скорости асинхронного двигателя со скалярным управлением

3. Расчет по формуле (6) коэффициентов числителя и знаменателя уточненной передаточной функции асинхронного двигателя для начальной частоты питающего напряжения 1 Гц.

4. Определение корней числителя и знаменателя передаточной функции асинхронного двигателя, соответствующей частоте 1 Гц.

5. Анализ корней и аппроксимация передаточной функции асинхронного двигателя динамическим звеном второго порядка вида

$$W_{\text{oy}}^{f_1}(p) = \frac{\omega(p)}{f_1(p)} = \frac{k_{\text{oy}}^{f_1}}{a_{011}p^2 + a_{111}p + 1},$$

где $a_{011} = T_{11}T_{22} + T_{\kappa 2}^2 - T_{\kappa 1}^2$; $a_{111} = T_{11} + T_{22} + 2\xi_{\kappa 2}T_{\kappa 2} - 2\xi_{\kappa 1}T_{\kappa 1}$; T_{11} и T_{22} – постоянные времени знаменателя передаточной функции (2), которые отсутствуют в числителе из-за разности порядков; $T_{\kappa 1}$, $T_{\kappa 2}$, $\xi_{\kappa 1}$ и $\xi_{\kappa 2}$ – постоянные времени и коэффициенты демпфирования числителя и знаменателя, величины которых различаются более, чем на 5%.

6. Определение коэффициентов передачи частотного преобразователя k_{cn} , двигателя $k_{\text{oy}}^{f_1}$ и обратной связи по скорости k_{occ} .

7. Определение постоянной времени частотного преобразователя T_{cn} как периода смена информации на его входе.

8. Расчет по формулам параметров настройки ПИД-регулятора скорости по формулам:

$$T_u = 8k_{cn}k_{dy}^{f_1}k_{occ}T_{cn}, \quad T_d = \frac{a_{011}}{8k_{cn}k_{dy}^{f_1}k_{occ}T_{cn}}, \quad k_n = \frac{a_{111}}{8k_{cn}k_{dy}^{f_1}k_{occ}T_{cn}}, \quad (7)$$

где T_u , T_d и k_n – постоянные времени интегрирования, дифференцирования и коэффициент пропорциональной части ПИД-регулятора.

Для асинхронного двигателя 1LA7060-4AB10-Z, управляемого частотным преобразователем Micromaster 440, произведен расчет параметров регулятора по формулам (7) и приведены результаты компьютерного моделирования, показывающие, что предлагаемый одноконтурный электропривод стабилизации наряду с простотой технической реализации обладает высоким быстродействием и малой статической погрешностью. Показано, что при частоте замыкания программного цикла микроконтроллера 500 Гц, на котором реализован одноконтурный электропривод со скалярным управлением, достижимое быстродействие характеризуется временем переходного процесса 0,044 с.

Рассмотрен вопрос бездатчикового управления асинхронным двигателем с применением наблюдателя скорости.

На демонстрационном стенде Sidemo, оснащенный двигателем 1LA7060-4AB10-Z и частотным преобразователем Micromaster 440 проведены натурные эксперименты, которые доказали адекватность проведенных теоретических исследований. Натурные эксперименты позволили также сделать вывод, что неравномерность вращения ротора асинхронного двигателя на малых скоростях в предлагаемом одноконтурном электроприводе со скалярным управлением почти в 2 раза меньше, чем в системе векторного управления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты выполненной диссертационной работы можно сформулировать следующим образом:

1. Разработан способ коммутации силовых транзисторов низковольтного частотного преобразователя, обеспечивающий синусоидальную широтно-импульсную модуляцию, снижение коммутационных потерь в 2 раза, увеличение максимальное действующее значение выходного напряжения инвертора на 7,7 %

и уменьшение величины суммарного коэффициент гармонических составляющих в 48 раз.

2. Разработан цифровой модулятор для частотного преобразователя, реализующий предложенный энергоэффективный способ коммутации силовых транзисторов.

3. Получены аналитические зависимости, позволяющие определять гармонический состав выходного напряжения частотного преобразователя при традиционной синусоидальной широтно-модуляции с учетом «мертвого» времени, вводимого при переключении транзисторов каждого полумоста, и при новом способе коммутации силовых транзисторов.

4. Разработана уточненная линеаризованная математическая модель асинхронного двигателя при скалярном частотном управлении в виде передаточных функции по управляющим и возмущающему воздействиям, позволяющие производить расчеты с погрешностью, не превышающей 6,1% по сравнению с нелинейной моделью.

5. Разработана методика параметрического синтеза регулятора одноконтурного электропривода стабилизации скорости, обеспечивающая снижение коэффициента неравномерности вращения на малых скоростях в 2 раза по сравнению с векторным управлением и высокое быстродействие, определяемое временем переходного процесса 0,044 с.

Рекомендации

1. Разработанный способ коммутации силовых транзисторов низковольтного частотного преобразователя и цифровой модулятор для его реализации рекомендуется применять на предприятиях, занимающихся выпуском элементной базы для создания электроприводов переменного тока.

2. Разработанная методика параметрического синтеза регулятора одноконтурного электропривода стабилизации скорости асинхронного двигателя может быть использованы предприятиями, выпускающими или эксплуатирующими механизмы с многодвигательными приводами, погружные электродвигатели, ленточные конвейеры.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Дальнейшая разработка по данной теме может быть направлена на разработку энергоэффективных способов коммутации силовых транзисторов частотных преобразователей, использующих векторное представление выходного напряжения и создание быстродействующих электроприводов с квазивекторным управлением.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Стариков А.В. Линеаризованная математическая модель погружного асинхронного двигателя / А.В. Стариков, С.Л. Лисин, Т.В. Табачникова, И.А. Косорлуков, **О.С. Беляева** // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки», № 4 (64) – 2019. – Самара: СамГТУ, 2019. – С. 155 – 167.
2. Стариков А.В. Наблюдатель скорости вращения асинхронного двигателя / А.В. Стариков, Е.В. Стрижакова, **О.С. Беляева**, А.А.К. Альтахер // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки», Т. 28. № 4 – 2020. – Самара: СамГТУ, 2020. – С. 155 – 166.
3. Стариков А.В. Способ уменьшения амплитуд высших гармоник в выходном напряжении частотного преобразователя / А.В. Стариков, С.Л. Лисин, **О.С. Беляева**, В.А. Кирдяшев // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки», Т. 29. № 1 – 2021. – Самара: СамГТУ, 2021. – С. 120 – 132.

- в прочих сборниках и материалах:

4. Стариков А.В. Разработка экономичных законов коммутации силовых транзисторов частотных преобразователей станций управления погружными насосами / А.В. Стариков, С.Л. Лисин, И.А. Косорлуков, **О.С. Беляева** // Ашировские чтения: Сб. трудов Международной научно-практической конференции. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2019. – С. 373 – 377.
5. Стариков А.В. Повышение энергетической эффективности станций управления погружными насосами с частотными преобразователями / А.В. Стариков,

О.С. Беляева, В.А. Кирдяшев // Ашировские чтения: Сб. трудов Всероссийской научно-практической конференции. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2021. – С. 499 – 508.

6. Starikov A.V. The Analytical Research of the "Dead" Time Influence on the Harmonic Composition of the Frequency Converter Voltage / A.V. Starikov, **O.S. Belyaeva**, V.A. Kirdyashev // SMART Automatics and Energy, Proceedings of SMART-ICAE 2021, SIST, vol. 272, 2022. – pp. 427 – 437.

- патенты:

7. Патент № 2762287. Цифровой модулятор для преобразователя частоты / А.В. Стариков, С.Л. Лисин, **О.С. Беляева**, В.А. Кирдяшев (Россия) // Оpubл. 17.12.2021, Бюл. № 35.

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета Д 212.217.04
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»
(протокол № 4 от 29 марта 2022 г.)

Заказ № _____. Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе.

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

Отдел типографии и оперативной полиграфии

443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244