

На правах рукописи



Рокало Даниил Юрьевич

**БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ СЛЕДЯЩИЙ
ЭЛЕКТРОПРИВОД ПЕРЕМЕННОГО ТОКА
С ТРАПЕЦЕИДАЛЬНЫМ ФАЗНЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ**

Специальность: 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара – 2019

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 «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», г. Нижний Новгород

Защита диссертации состоится 25 декабря 2019 в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.217.04 по адресу: г. Самара, ул. Первомайская, 18, Самарский государственный технический университет, корпус 1, ауд. № 4а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Самарского государственного технического университета по адресу: г. Самара, ул. Первомайская, 18, корпус 1.

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 « ____ » _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.217.04



Е.В. Стрижакова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена разработке и исследованию быстродействующего следящего электропривода переменного тока с частотным преобразователем, формирующим трехфазную систему трапецеидальных фазных напряжений

Актуальность работы

Асинхронные и синхронные двигатели превосходят двигатели постоянного тока по конструктивной простоте, надежности и эксплуатационным характеристикам. В связи с этим в настоящее время интерес к электроприводам переменного тока непрерывно растет.

Особую роль в промышленности играют следящие электроприводы переменного тока, быстродействие которых в основном определяет динамическую точность прецизионного оборудования, например, станков и промышленных роботов. Поэтому исследования, направленные на повышение быстродействия следящих электроприводов переменного тока, являются актуальными.

Однако следует отметить, что кроме быстродействия любой электропривод характеризуется энергетической эффективностью, которая определяется в частности потерями в элементах привода. Структура этих потерь сложна, однако одним из аспектов повышения энергетической эффективности следящего электропривода переменного тока является снижение коммутационных потерь в силовых транзисторах частотного преобразователя. Поэтому работы, направленные на уменьшение этих потерь в сочетании с обеспечением малых коэффициентов высших гармоник в выходном сигнале инвертора, также являются актуальными.

Современная тенденция в развитии следящих электроприводов переменного тока заключается в применении разных периодов дискретизации при вычислении составляющих закона регулирования и программируемой логики при технической реализации отдельных элементов привода. При этом актуальной является задача создания аналитических математических моделей цифровых следящих электроприводов переменного тока с учетом разных периодов дискретизации и особенностей их технической реализации.

Степень разработанности проблемы

Разработке и математическому описанию электроприводов переменного тока посвящены исследования большого количества российских и иностранных ученых. Такие ученые, как А.С. Анучин, И.Я. Браславский, А.А. Булгаков, А.Б. Виноградов, С.Я. Галицков, Д.Н. Джабасова, В.И. Доманов, Ю.Н. Калачев, В.Г. Каширских, С.А. Ковчин, В.Ф. Козаченко, А.Е. Козярук, С.Л. Лисин, М.С. Лысов, Н.В. Мишин, 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, А.А. Усольцев, И.И. Эпштейн, В.К. Bose, J. Holts, W. Leonard и множество других проводили изыскания в области электроприводов переменного тока с синхронными и асинхронными исполнительными двигателями.

Но в известных работах не затронут вопрос математической модели цифрового следящего электропривода, использующего разные периоды дискретизации при вычисления отдельных составляющих закона регулирования, не смотря на то, что фактически во многих современных приводах такой подход применяют.

Большое количество исследований посвящено принципам управления силовыми полупроводниковыми приборами частотных преобразователей. В этих работах показано, что на современном этапе развития минимумом коммутационных потерь обладают инверторы с векторными модуляторами, которые на каждом периоде широтно-импульсной модуляции (ШИМ) коммутируют четыре транзистора силового преобразователя.

Однако, более простой технической реализацией и низкими коммутационными потерями обладают частотные преобразователи, которые формируют трапецеидальное фазное напряжение на статорных обмотках двигателя переменного тока (при соединении этих обмоток в «звезду»).

Следует также отметить, что аналитических исследований гармонического состава выходного напряжения инверторов с учетом процесса ШИМ и различных законов коммутации силовых транзисторов практически невозможно

найти в современных научных публикациях.

Анализ степени разработанности проблемы позволил сформулировать цель диссертационной работы.

Цель диссертационной работы – повышение эффективности следящего электропривода переменного тока.

Задачи диссертационного исследования:

1. Разработка частотного преобразователя, формирующего трапецеидальное фазное напряжение и обеспечивающего снижение коммутационных потерь в силовых транзисторах.

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

3. Разработка технической реализации быстродействующего следящего электропривода переменного тока на программируемой логике.

4. Создание дискретной математической модели цифрового следящего электропривода переменного тока с учетом разных периодов дискретизации отдельных составляющих закона регулирования.

5. Проведение натуральных экспериментов, подтверждающих адекватность теоретических исследований.

Объектом исследования является электропривод переменного тока.

Предметом исследования является быстродействующий следящий электропривод переменного тока, математическая модель электропривода, частотный преобразователь, формирующий трапецеидальное фазное напряжение.

Методы решения

В работе использовались методы теории электропривода, теоретических основ электротехники, электрических машин, разложения в гармонический ряд Фурье, преобразования Лапласа и z-преобразования, численного моделирования в программной среде «Matlab Simulink».

Научная новизна

1. Разработан новый подход к построению частотного преобразователя с трапецеидальным фазным напряжением, отличающийся простотой технической реализации и снижением коммутационных потерь в силовых транзисторах.

2. Получены аналитические выражения для определения гармонического состава выходного напряжения частотного преобразователя при трапецеидальной форме фазного напряжения статора, отличающиеся учетом процессов широтно-импульсной модуляции.

3. Разработана дискретная математическая модель цифрового следящего электропривода, отличающаяся учетом разных периодов дискретизации при вычислении отдельных составляющих закона регулирования и особенностей структурного построения.

Практическая значимость результатов работы

1. Разработанный следящий электропривод переменного тока с трапецеидальным 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.

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

Реализация результатов работы

Основные результаты работы были использованы в ЗАО «Стан-Самара» (г. Самара) при проведении проектно-конструкторских и наладочных работ и в учебном процессе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», что подтверждается актами внедрения.

Апробация работы

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на XXIV Международной научной конференции «Технические науки – от тео-

рии к практике» (г. Санкт-Петербург, 2017), Международной научно-практической конференции «Ашировские чтения» (г. Самара, 2018) и Международной научной конференции «FarEastCon» (г. Владивосток, 2018) и XXXXIII Международной научной конференции «Технические науки – от теории к практике» (г. Санкт-Петербург, 2019).

Публикации

По теме диссертации опубликованы 10 печатных работ общим объемом 4,29 п.л., в том числе 5 статей в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях из перечня ВАК РФ, 1 статья индексируемая в международных базах цитирования Web of Science и Scopus и 1 патент на изобретение.

Личный вклад автора состоит в разработке цифрового модулятора, формирующего с помощью трехфазного транзисторного моста трапецеидальное фазное напряжение; в получении формул, позволяющих определить величину амплитуд высших гармоник в выходном сигнале частотного преобразователя с учетом процесса широтно-импульсной модуляции; в разработке варианта технической реализации регуляторов следящего электропривода на программируемой логике; в определении дискретной передаточной функции разработанного следящего электропривода с учетом разных периодов дискретизации при вычислении отдельных составляющих закона регулирования; в проведении вычислительных и натурных экспериментов.

На защиту выносятся:

1. Обоснование структурного построения следящего электропривода переменного тока и применения частотного преобразователя с трапецеидальным фазным напряжением.

2. Результаты исследования гармонического состава выходного сигнала частотного преобразователя с трапецеидальным фазным напряжением с учетом процесса широтно-импульсной модуляции

3. Вариант технической реализации быстродействующего следящего электропривода переменного тока на программируемой логике.

4. Дискретная математическая модель цифрового следящего электропривода с учетом разных периодов дискретизации отдельных составляющих закона регулирования и особенностей структурного построения.

5. Результаты натуральных экспериментов по оценке адекватности проведенных теоретических исследований.

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 приложений. Основная часть работы изложена на 122 страницах машинописного текста, иллюстрирована 56 рисунками и 15 таблицами. Библиографический список содержит 90 наименований на 10 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности задачи разработки быстродействующего следящего электропривода переменного тока с трапецеидальным фазным напряжением, сформулированы цель и задачи исследования, отмечена научная новизна и практическая значимость диссертационной работы.

В первой главе рассмотрены известные принципы структурного построения следящих электроприводов переменного тока. Рассмотрены три основных типа построения следящих электроприводов переменного тока: система векторного подчиненного регулирования, многоконтурных систем с одной из-

меряемой координатой и их линейная комбинация. Проанализированы данные о быстродействии известных следящих электроприводов переменного тока. Рассмотрены основные принципы построения частотных преобразователей и способы коммутации силовых транзисторов автономных инверторов с широтно-импульсной модуляцией. Проанализирован гармонический состав выходного напряжения частотных преобразователей в зависимости от способа коммутации. Проведен обзор известных дискретных математических моделей цифровых следящих электроприводов переменного тока.

Во второй главе проведено обоснование применения в следящих электроприводах переменного тока частотных преобразователей, формирующих трапецеидальное фазное напряжение.

Произведен анализ действующего значения и гармонического состава выходного сигнала частотных преобразователей с $\frac{2}{3}\pi$ - и π -коммутацией силовых транзисторов. Показано, что амплитуды высших гармоник в выходном напряжении таких инверторов имеют большие значения. Например, амплитуда 5-ой гармоники составляет 20% от основной, 7-ой гармоники – 14,29%, 11-ой – 9,09% и т.д. Несмотря на это в следящих электроприводах, построенных по принципам многоконтурных систем с одной измеряемой координатой, с синхронными исполнительными двигателями и силовыми преобразователями с $\frac{2}{3}\pi$ - коммутацией силовых транзисторов достигнуто высокое быстродействие (время переходного процесса составляет 0,32 с). Отмечено, что такое быстродействие полностью совпадает с теоретическими расчетами. Это позволило сделать вывод, что плохой гармонический состав выходного напряжения инвертора практически не влияет на быстродействие следящего электропривода. Поэтому предложено в следящих приводах переменного тока использовать частотные преобразователи, которые формируют трапецеидальную форму фазного напряжения, что позволит существенно упростить их техническую реализацию.

Получена обобщенная формула для определения коэффициентов ряда Фурье при разложении трапецеидального напряжения

$$\left. \begin{aligned} b_{2l+1} &= 0, \text{ при } r = 0; \\ b_{2l+1} &= \frac{2\sqrt{3}}{(2l+1)\pi} U_m^{2/3\pi}, \text{ при } r = 1 \text{ и } r = 2, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $l = 0, 1, 2, 3, \dots$ – целое число; целочисленный остаток от деления $2l + 1$ на 3;
 U_m^{tr} – амплитуда трапецеидального фазного напряжения.

По формулам (1) посчитаны относительные значения коэффициентов высших гармоник $K_{U(n)}^{tr}$ и сравнены с аналогичными коэффициентами $K_{U(n)}^{\pi}$ при π -коммутации транзисторов (таблица 1).

Таблица 1 – Расчетные значения нечетных гармоник с 3 по 39 в частотных преобразователях с π -коммутацией транзисторов и с трапецеидальным фазным напряжением

Номер гармоники n	Расчетное значение $K_{U(n)}^{\pi}, \%$	Расчетное значение $K_{U(n)}^{tr}, \%$
3	0	0
5	20	4
7	14,29	2,041
9	0	0
11	9,09	0,826
13	7,69	0,592
15	0	0
17	5,88	0,346
19	5,26	0,277
21	0	0
23	4,35	0,189
25	4,0	0,16
27	0	0
29	3,45	0,119
31	3,23	0,104
33	0	0
35	2,86	0,082
37	2,7	0,073
39	0	0

Данные таблицы убедительно показывают целесообразность применения трапецеидального фазного напряжения в следящих электроприводах переменного тока.

Проанализировано влияние трапецеидальной формы трехфазной системы напряжений на скорость вращения и величину модуля вектора напряжения статора асинхронного электродвигателя. Показано, что наблюдается вариация модуля вектора напряжения, которая составляет 7,18 % от среднего значения. Также имеет место неравномерность вращения вектора напряжения, причем максимальная погрешность скорости вращения равна 12,17 %.

За счет инерционности статорных цепей неравномерность вращения результирующего вектора тока меньше, чем вектора напряжения. Показано, что вариация модуля вектора тока составляет всего 1,92%, причем максимальная погрешность скорости вращения равна 8,4%.

В третьей главе предложена функциональная схема частотного преобразователя формирующего трапецеидальное фазное напряжение (рисунок 1).

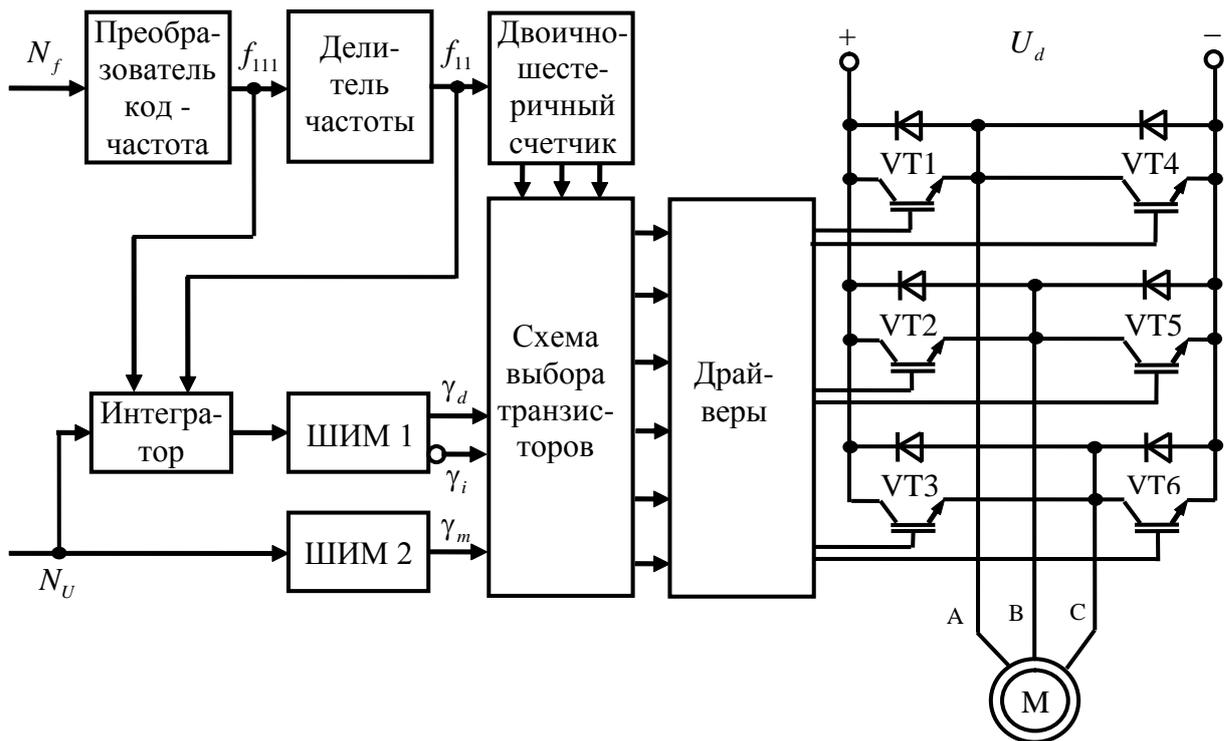


Рисунок 1 – Функциональная схема частотного преобразователя, формирующего трапецеидальную форму фазного напряжения

Она содержит преобразователь код – частота, делитель частоты, двоично-шестеричный счетчик, интегратор, два широтно-импульсных модулятора ШИМ1 и ШИМ2, схему выбора транзистора, драйверы управления процессами

включения и выключения силовых транзисторов $VT1 - VT6$ частотного преобразователя. Преобразователь код – частота представляет собой логическую схему, на выходе которой формируется частота

$$f_{111} = 6\nu f_1,$$

где ν – коэффициент деления делителя частоты; f_1 – требуемая частота на выходе преобразователя, задаваемая цифровым кодом N_f .

Эта частота определяет постоянную времени интегратора, на вход которого подается цифровой код N_U , пропорциональный требуемой величине амплитуды фазного напряжения U_1 . На выходе интегратора формируется линейно-нарастающий цифровой код, который подается на вход ШИМ1. При этом на выходах первого широтно-импульсного модулятора получают сигналы переменной скважности: γ_d – на прямом, $\gamma_i = 1 - \gamma_d$ – на инверсном.

Алгоритм работы схемы выбора транзисторов представлен таблицей режима функционирования силовых ключей (таблица 2).

Таблица – Режимы функционирования силовых ключей

ωt , 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_d	γ_m	γ_i	Выкл.	Выкл.	Выкл.
Режим $VT2$	Выкл.	Выкл.	γ_d	γ_m	γ_i	Выкл.
Режим $VT3$	γ_i	Выкл.	Выкл.	Выкл.	γ_d	γ_m
Режим $VT4$	Выкл.	Выкл.	Выкл.	γ_d	γ_m	γ_i
Режим $VT5$	γ_m	γ_i	Выкл.	Выкл.	Выкл.	γ_d
Режим $VT6$	Выкл.	γ_d	γ_m	γ_i	Выкл.	Выкл.

Анализ таблицы показывает, что на каждом периоде широтно-импульсной модуляции работают три транзистора (а при максимальной величине напряжения только два), и это является одним из достоинств частотного

преобразователя, формирующего трапецеидальную форму фазного напряжения. Коммутационные потери в рассматриваемом частотном преобразователе как минимум на 25 % меньше, чем в устройствах с векторной модуляцией, и вдвое ниже по сравнению с синусоидальной модуляцией.

Для реализации алгоритма, приведенного в таблице 2, и формирования трапецеидальной формы фазного напряжения разработан цифровой модулятор.

Еще одно достоинство рассматриваемого частотного преобразователя определяется исключительной простотой технической реализации. Действительно, в разработанном цифровом модуляторе, формирующем трапецеидальную форму фазных напряжений, не надо производить никаких вычислений на периоде ШИМ, и он может быть реализован на программируемой логической интегральной схеме.

Проведено исследование гармонического состава разработанного частотного преобразователя с учетом процесса широтно-импульсной модуляции. Поскольку трапецеидальное фазное напряжение формируется с помощью ШИМ, то при этом получается кусочно-постоянная функция $f(\theta)$, принимающая значения 0 или U_m^r на различных участках угла θ (рисунок 2).

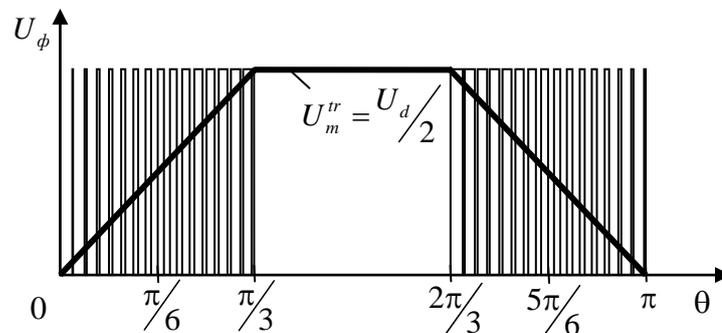


Рисунок 2 – Форма фазного напряжения на выходе частотного преобразователя, определенная на половине периода

Для рассматриваемого случая четные коэффициенты равны нулю, а нечетные будут определяться выражением

$$b_n = -\frac{2U_m^{tr}}{n\pi} \left\{ \cos[n(2\nu+1)\theta_1] - \cos(n\nu\theta_1) + \sum_{h=1}^{\nu-1} \left\{ \cos[nh(\theta_1 + \theta_2)] - \cos(nh\theta_1) + \right. \right. \\ \left. \left. + \cos[n(2\nu+h+1)\theta_1] - \cos\{n[(2\nu+h)\theta_1 + h\theta_2]\} \right\} \right\}, \quad (2)$$

где U_m^{tr} – амплитуда импульсов при трапецеидальной модуляции; $\theta_1 = \frac{2\pi f_1}{f_{ШИМ}}$;

$\theta_2 = \frac{\theta_1 U_1}{\nu U_{1\max}}$; f_1 и U_1 – частота и действующее значение фазного напряжения,

формируемого на статоре асинхронного двигателя; $U_{1\max}$ – максимальная величина действующего значения фазного напряжения на выходе частотного преобразователя.

Формула (2) справедлива для случая, когда $f_1 = 50$ Гц, несущая частота ШИМ $f_{ШИМ} = 4,8$ кГц, коэффициент деления делителя частоты $\nu = 16$ и $U_1 = U_{1\max}$. Адекватность этой формулы подтверждается расчетом 307 коэффициентов ряда и построением с их помощью графика фазного напряжения (рисунок 3).

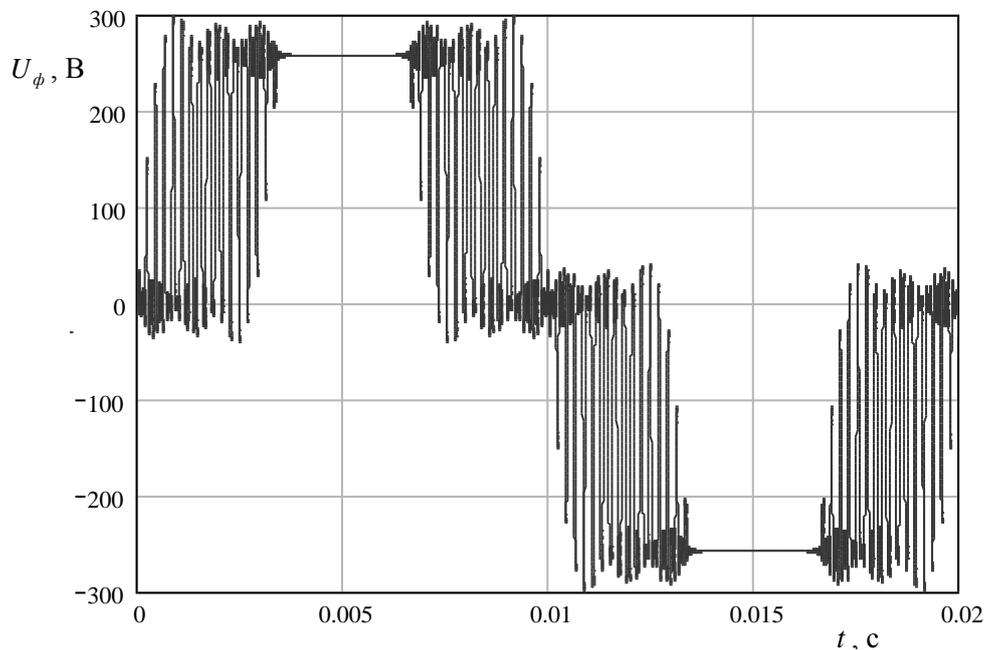


Рисунок 3 – Аппроксимация рядом Фурье трапецеидального фазного напряжения, формируемого широтно-импульсной модуляцией

При увеличении частоты ШИМ в целое число $q = \frac{f_{ШИМ}}{6\nu f_{1ном}}$ раз относительно 4,8 кГц нечетные коэффициенты ряда Фурье могут быть определены с помощью выражения

$$b_n = -\frac{2U_m^{tr}}{n\pi} \left\{ \cos \left\{ n \left[q(2\nu + 1)\theta_1 \right] \right\} - \cos(nq\nu\theta_1) + \right. \\ \left. + \sum_{h=1}^{\nu-1} \sum_{j_1=0}^{q-1} \left\{ \cos \left\{ n \left[(qh + j_1)\theta_1 + h\theta_2 \right] \right\} - \cos \left[n(qh + j_1)\theta_1 \right] + \right. \right. \\ \left. \left. + \cos \left\{ n \left[q(2\nu + h) + j_1 + 1 \right] \theta_1 \right\} - \cos \left\{ n \left[q(2\nu + h) + j_1 \right] \theta_1 + h\theta_2 \right\} \right\} \right\}, \quad (3)$$

где h и j_1 – целые числа.

Исследовано также влияние широтно-импульсной модуляции на гармонический состав выходного напряжения частотного преобразователя при изменении частоты первой гармоники.

Показано, что алгоритм работы цифрового модулятора влияет на амплитуды высших гармоник в выходном напряжении частотного преобразователя. Разработанный частотный преобразователь с трапецеидальным фазным напряжением был реализован на цифровых микросхемах средней степени интеграции (рисунок 4). Его испытания показали работоспособность и формирование фазного напряжения по трапецеидальному закону при соединении трехфазной нагрузки в звезду. В частности при максимальном сигнале задания, что соответствует частоте 50 Гц, осциллограмма фазного напряжения имеет вид, приведенный на рисунке 5.

В четвертой главе для реализации быстродействующего электропривода переменного тока было выбрано его трехконтурное структурное построение (рисунок 6). Следящий электропривод имеет контур скорости и два контура положения с коэффициентом передачи k_{om} . Для организации обратной связи по скорости выходной сигнал датчика положения дифференцируется с помощью звена с передаточной функцией $W_{occ}(p) = k_{occ}p$.

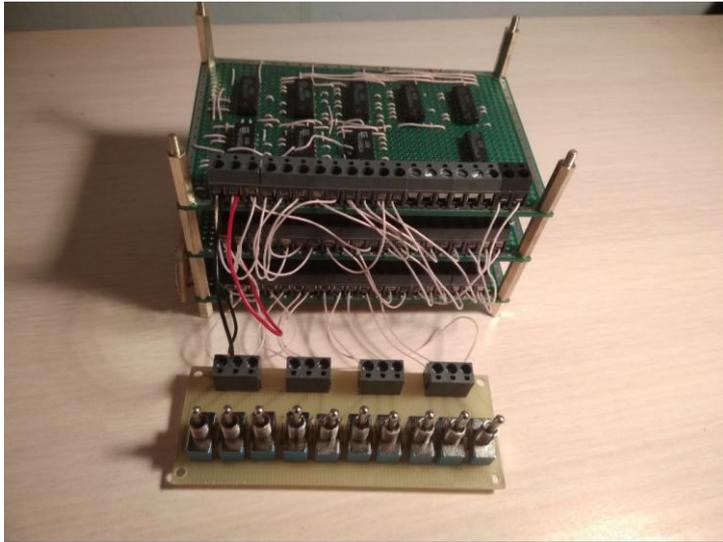


Рисунок 4 – Опытный вариант цифрового модулятора, формирующего трапецеидальное фазное напряжение на выходе частотного преобразователя

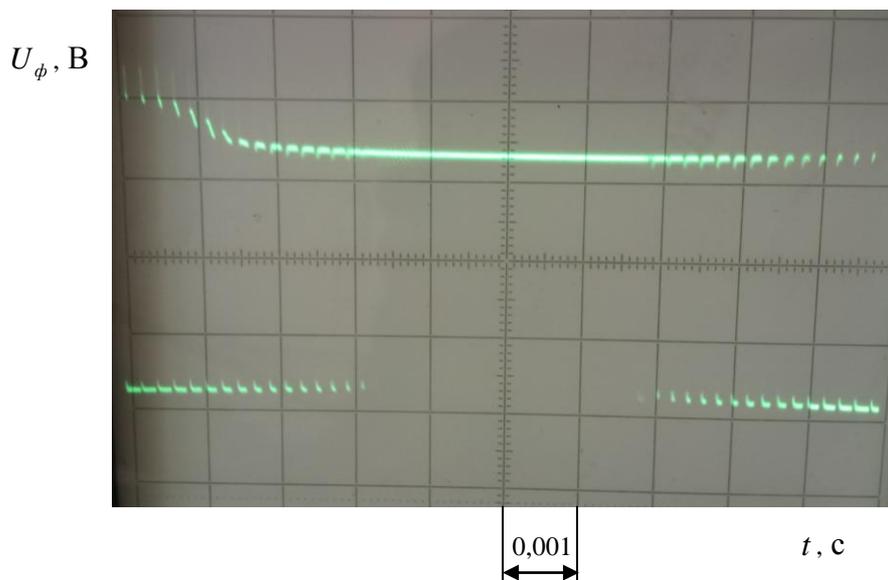


Рисунок 5 – Осциллограмма фазного напряжения в разработанном частотном преобразователе

Во внутреннем контуре применен пропорционально-дифференциальный (ПД) регулятор с параметрами k_{nd} и T_{nd} , во втором контуре пропорциональный регулятор с коэффициентом передачи k_n , а в третьем – интегральный с постоянной времени T_u . Объект управления (двигатель с исполнительным механизмом) представлен интегро-колебательным звеном с коэффициентом передачи k_{oy} , постоянной времени T_k и коэффициентом демпфирования ξ_k .

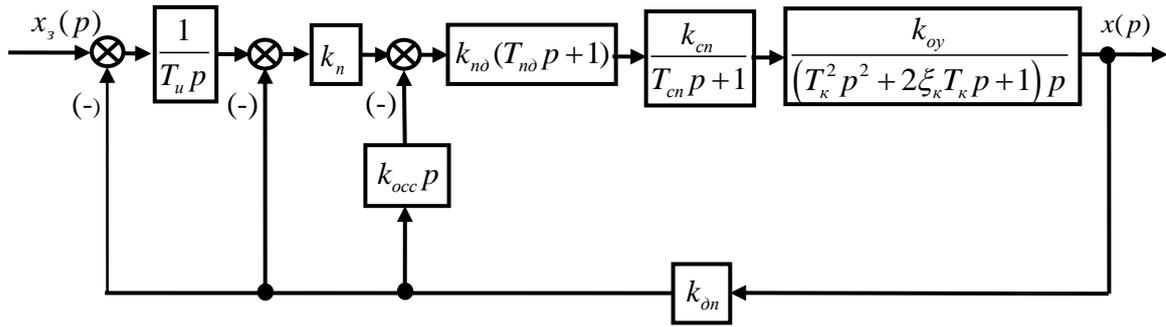


Рисунок 6 – Структурная схема быстродействующего следящего электропривода переменного тока

Передаточная функция силового (частотного) преобразователя принята в виде аperiodического звена с коэффициентом передачи k_{cn} и постоянной времени T_{cn} .

Методика синтеза такого электропривода позволяет выбрать параметры регуляторов такими, чтобы их можно было просто реализовать средствами цифровой техники. Действительно, при программной реализации на микроконтроллере величины $\frac{T_u}{T}$, k_n , k_{nd} и $\frac{k_{occ}}{T}$ могут взяты кратными двум (где T – период дискретизации). Все это создает предпосылки и для реализации регуляторов быстродействующего следящего электропривода переменного тока на программируемой логике. Вариант такой технической реализации представлен в диссертационной работе.

Реализация регуляторов на программируемой логике схеме позволяет использовать разные периоды дискретизации при вычислении интегралов и производных.

Найдена дискретная передаточная функция замкнутого следящего электропривода с учетом разных периодов дискретизации отдельных составляющих закона регулирования

$$W_3^{m_1 m_2}(z) = \frac{B_{03}z^{m_1+m_2+3} + B_{13}z^{m_1+m_2+2} + B_{23}z^{m_1+m_2+1} + B_{33}z^{m_2+3} + B_{43}z^{m_2+2} + B_{53}z^{m_2+1}}{z^{m_1+m_2+4} + A_{13}z^{m_1+m_2+3} + A_{23}z^{m_1+m_2+2} + A_{33}z^{m_1+m_2+1} + A_{43}z^{m_1+3} + A_{53}z^{m_1+m_2} + A_{63}z^{m_1+2} + A_{73}z^{m_1+1} + A_{83}z^{m_2+3} + A_{93}z^{m_2+2} + A_{103}z^{m_2+1} + A_{113}z^3 + A_{123}z^2 + A_{133}z^{m_2} + A_{143}z^2 + A_{153}z + A_{163}}$$

где m_1 – целое число, показывающее, во сколько раз период дискретизации при вычислении производной в ПД-регуляторе больше, чем при нахождении интеграла в соответствующем регуляторе; m_2 – целое число, показывающее во сколько раз период дискретизации при вычислении производной в цепи обратной связи по скорости больше, чем при определении интеграла; $B_{03} - B_{53}$ и $A_{13} - A_{143}$ – коэффициенты передаточной функции, имеющие сложную связь с параметрами следящего электропривода.

Адекватность математической модели следящего электропривода переменного тока с учетом разных периодов дискретизации проверена методом сравнения результатов компьютерного моделирования с натурными экспериментами (рисунок 7). Время переходного процесса в эксперименте составило $t_{mn}^{экс} = 0,061$ с, что подтверждает работоспособность и высокое быстродействие разработанного следящего электропривода переменного тока. Расхождение расчетного времени переходного процесса с результатом натурального эксперимента не превышает 1,64 %. Поэтому можно утверждать, что разработанная математическая модель следящего электропривода переменного тока с учетом разных периодов дискретизации отдельных составляющих закона регулирования адекватна реальным процессам, протекающим в электроприводе.

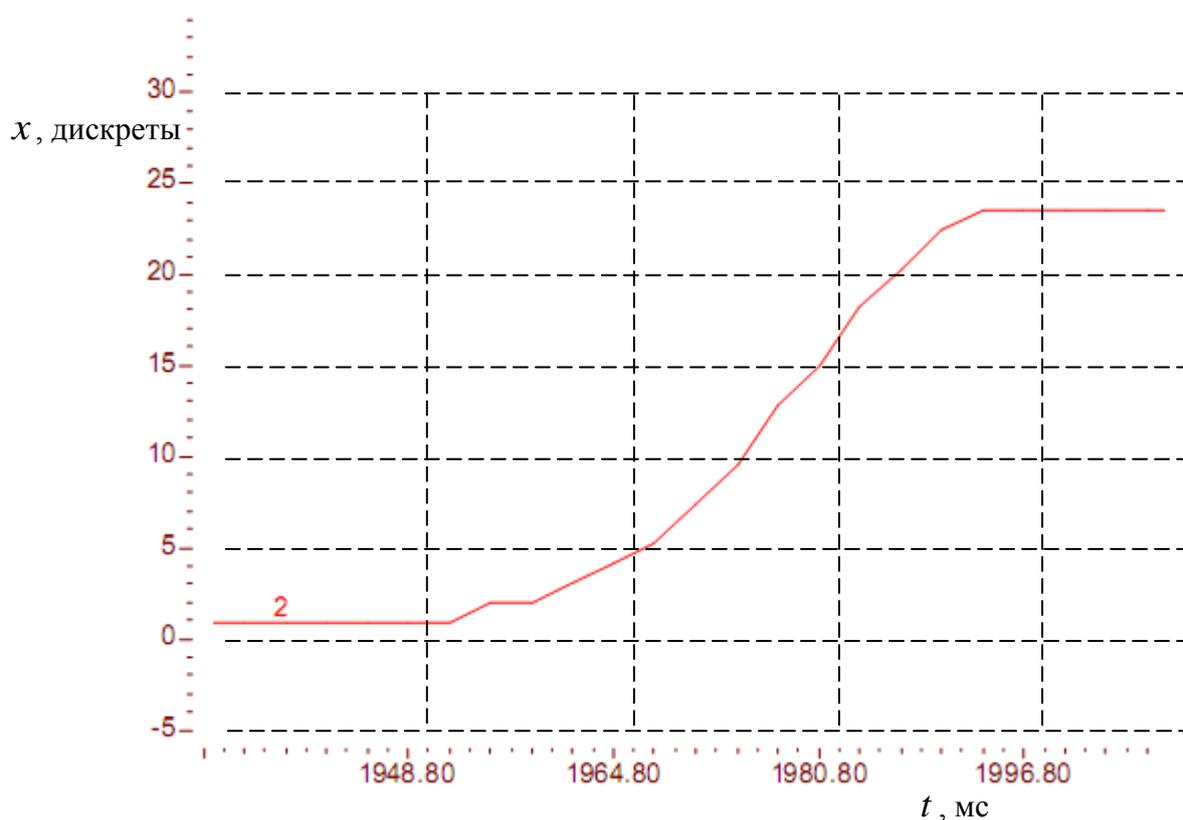


Рисунок 7 – Экспериментальный график переходного процесса в следящем электроприводе переменного тока при разных периодах дискретизации

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертационной работы можно сформулировать следующим образом:

1. Разработан частотный преобразователь, формирующий трапецеидальное фазное напряжение на статорных обмотках асинхронного двигателя и обеспечивающий снижение коммутационных потерь в силовых транзисторах как минимум на 25 %.

2. Показано, что при трапецеидальной форме фазного напряжения вариация модуля вектора тока составляет 1,92%, а максимальное изменение скорости вращения этого вектора равно 8,4%.

3. Получены аналитические выражения, позволяющие рассчитать коэффициенты высших гармоник на выходе частотного преобразователя с трапецеидальным фазным напряжением с учетом процессов широтно-импульсной

модуляции. Показано, что при максимальном выходном напряжении суммарный коэффициент высших гармоник с номерами от 0 до 40 не превышает 4,7%.

4. Разработан вариант технической реализации следящего электропривода переменного тока на программируемой логической интегральной схеме с минимумом вычислительных процедур.

5. Найдена дискретная математическая модель следящего электропривода переменного тока с учетом разных периодов дискретизации отдельных составляющих закона регулирования и доказана ее адекватность, поскольку расхождение результатов моделирования и натурального эксперимента не превышает 1,64 %.

Рекомендации

1. Разработанный следящий электропривод переменного тока рекомендуется внедрять на предприятиях, занимающихся выпуском прецизионные станочного оборудования и промышленных роботов.

2. Результаты исследования могут быть использованы предприятиями, занимающимися выпуском элементной базы для создания электроприводов переменного тока.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Дальнейшая разработка темы может быть направлена на создание частотных преобразователей с синусоидальными фазными и линейными напряжениями и малыми коммутационными потерями.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Стариков А.В. Влияние трапецеидальной формы напряжения на вращение магнитного поля в электродвигателях переменного тока / А.В. Стариков, Д.Ю. **Рокало** // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки», № 3 (47) – 2015. – Самара: СамГТУ, 2015. – С. 149 – 153

2. Стариков А.В. Математическая модель цифрового следящего электропривода с асинхронным исполнительным двигателем / А.В. Стариков, Д.Н. Джабасова, **Д.Ю. Рокало** // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки», № 2 (50) – 2016. – Самара: СамГТУ, 2016. – С. 162 – 168.
3. Стариков А.В. Анализ гармонического состава трапецеидального фазного напряжения, формируемого частотным преобразователем / А.В. Стариков, В.В. Кузнецов, **Д.Ю. Рокало** // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки», № 3 (55) – 2017. – Самара: СамГТУ, 2017. – С. 75 – 79.
4. Стариков А.В. Анализ качества выходного напряжения частотных преобразователей с простейшими законами коммутации силовых транзисторов / А.В. Стариков, С.Л. Лисин, **Д.Ю. Рокало** // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки», № 2 (58) – 2018. – Самара: СамГТУ, 2018. – С. 128 – 134.
5. Стариков А.В. Влияние широтно-импульсной модуляции на гармонический состав выходного напряжения частотного преобразователя / А.В. Стариков, С.Л. Лисин, **Д.Ю. Рокало** // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки», № 1 (61) – 2019. – Самара: СамГТУ, 2019. – С. 153 – 166.

- в изданиях, индексируемых в международных базах цитирования Web of Science и Scopus

6. Starikov A.V., Lisin S.L., Rokalo D.Yu. Increasing of the Response Speed of the Rotary Table Servo Drive // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), IEEE *Xplore*, 2019. – P. 1–5.

- в прочих сборниках и материалах:

7. Стариков А.В. Алгоритм расчета параметров регуляторов следящего электропривода с асинхронным двигателем / А.В. Стариков, Д.Н. Джабасова, **Д.Ю. Рокало** // Сборник публикаций научного журнала «Globus» по материалам XXIV международной научной конференции: «Технические науки – от теории

к практике» г. Санкт-Петербурга: сборник со статьями. – СПб.: Научный журнал «Globus», 2017. – С. 34 – 39.

8. Стариков А.В., Рокало Д.Ю. Влияние процесса коммутации силовых транзисторов в частотном преобразователе на работу электрооборудования погружного насоса / А.В. Стариков, **Д.Ю. Рокало** // Ашировские чтения: Сб. трудов Международной научно-практической конференции. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2018. – С. 366 – 370.

9. Стариков А.В. Особенности частотного преобразователя, формирующего трапецеидальное фазное напряжение / А.В. Стариков, С.Л. Лисин, **Д.Ю. Рокало**, Р.Р. Партузенков // Сборник публикаций научного журнала «Globus» по материалам XXXXIII международной научной конференции: «Технические науки – от теории к практике» г. Санкт-Петербурга: сборник со статьями. – СПб.: Научный журнал «Globus», 2019. – С. 70 – 76.

- охранные документы:

10. Патент России № 2844070, МПК H03K7/08. Цифровой модулятор для преобразования частоты / С.Л. Лисин, **Д.Ю. Рокало**, А.В. Стариков (Россия) // Оpubл. 07.02.2018, Бюл. № 4.

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета Д 212.217.04
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»
(протокол № 10 от 17 октября 2019 г.)

Заказ № 758. Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе.

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

Отдел типографии и оперативной полиграфии

443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244