

На правах рукописи



Гокова Марина Владимировна

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИНХРОННО-СИНФАЗНОГО
ЭЛЕКТРОПРИВОДА СКАНИРУЮЩИХ СИСТЕМ, ПОСТРОЕННОГО С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО ЛОГИЧЕСКОГО
УСТРОЙСТВА СРАВНЕНИЯ**

Специальность 05.09.03 –Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Омск 2014

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Омский государственный технический университет» на кафедре «Электрическая техника»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
БУБНОВ Алексей Владимирович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры «Электропривод и автоматизация
промышленных установок» федерального
государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего
профессионального образования «Новосибирский
государственный технический университет»
СИМАКОВ Геннадий Михайлович

кандидат технических наук, доцент, заведующий
кафедрой «Энергетика» федерального
государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего профессионального
образования «Нижевартовский государственный
университет»
МАЛЬГИН Геннадий Владимирович

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования «Сибирская
государственная автомобильно-дорожная академия
(СИБАДИ)»

Защита диссертации состоится 18 декабря 2014 года в 16-00 на заседании
диссертационного совета ДМ212.178.03 при Омском государственном
техническом университете по адресу: 644050, г. Омск, пр. Мира, 11, корп. 6, ауд.
340. Тел/факс (3812) 65-34-07, e-mail: dissov_omgtu@omgtu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Омского
государственного технического университета и на сайте omgtu.ru.

Автореферат разослан 21 октября 2014 года.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью
учреждения, просим направлять по адресу: 644050, г. Омск, пр. Мира 11, ученому
секретарю диссертационного совета ДМ212.178.03

Ученый секретарь

диссертационного совета ДМ212.178.03

канд. техн. наук, доцент



О.А. Лысенко

Общая характеристика диссертационной работы

Актуальность темы. В узлах оптико-механической развертки (ОМР) сканирующих систем используется синхронно-синфазный электропривод (ССЭ), позволяющий обеспечить высокие точностные показатели, установку начального углового положения вала электродвигателя и широкий диапазон регулирования угловой скорости. Актуальной является проблема разработки электроприводов для систем лазерного сканирования и обзорно-поисковых систем, осуществляющих автоматический обзор пространства в инфракрасном диапазоне спектра с целью получения информации о расположенных в нем объектах.

Основу синхронно-синфазного электропривода составляет электропривод с фазовой синхронизацией (ЭПФС), построенный по принципу фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Принцип ФАПЧ широко используется при построении систем синхронно-синфазного вращения и ряда других систем автоматического регулирования для обеспечения высоких точностных показателей системы управления.

Основное направление использования синхронно-синфазных электроприводов относится к информационно-измерительным системам, что определяет специфику их работы с точки зрения изменения момента нагрузки и момента инерции. В большинстве таких электроприводов момент инерции определяется конструкцией рабочего механизма, расположенного на валу электродвигателя, и практически не изменяется во время работы электропривода; а момент нагрузки зависит, в основном, от заданной частоты вращения и проявляется в небольшой статической ошибке регулирования электропривода по углу, которая может быть сведена к минимуму за счет правильного выбора структуры и параметров регулятора.

Основы теории построения прецизионных синхронно-синфазных электроприводов заложены в работах Р.М. Трахтенберга. Экспериментальные и теоретические исследования в этой области проводились различными научными коллективами. Значительный вклад в решение вопросов проектирования ССЭ внесли И.В. Булин-Соколов, В.И. Стребков, Б.А. Староверов, А.В. Ханаев, А.А. Киселев, В.П. Галас, М.В. Фалеев, Л.М. Осипов, Вл.В. Андрущук, Вас.В. Андрущук, В.Н. Зажирко, А.М. Сутормин, А.В. Бубнов, В.Г. Кавко и др. На этой основе спроектировано значительное количество электроприводов для различных областей применения, разработаны новые способы регулирования ЭПФС и ССЭ. Однако вопросы синтеза высокоэффективных систем управления ССЭ, обеспечивающих высокие точностные и динамические характеристики электропривода в широком диапазоне регулирования, освещены в литературе недостаточно полно.

Настоящая работа выполнена в рамках Аналитической ведомственной целевой программы Минобрнауки России «Развитие научного потенциала высшей школы», проекты № 2.1.2/4475 (2009-2010 гг.) и № 2.1.2/11230 (2011 г.) «Исследование динамики и разработка новых способов регулирования синхронно-синфазного электропривода для обзорно-поисковых систем» и гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 14-08-31109 МОЛ_А (2014 г.)

«Улучшение динамических показателей качества регулирования прецизионного электропривода».

Объект и предмет исследования. Объектом исследования является синхронно-синфазный электропривод. Предметом исследования являются структурные схемы, параметры и характеристики электропривода в режимах синхронизации и фазирования.

Целью диссертационной работы является усовершенствование способов регулирования синхронно-синфазного электропривода, реализованного на основе многофункционального логического устройства сравнения.

Связь темы диссертации с общенаучными (государственными) программами и планом работы университета. Настоящая работа выполнена в рамках Аналитической ведомственной целевой программы Минобрнауки России «Развитие научного потенциала высшей школы» и гранта Российского фонда фундаментальных исследований.

Таким образом, данная диссертационная работа содержит решение задачи, имеющей важное значение для развития теории дискретного электропривода, построенного на основе принципа ФАПЧ.

Методы исследований. При теоретическом исследовании режима синхронизации ЭПФС использовался метод фазовой плоскости. Применялся модальный метод синтеза систем автоматического управления. Разработка способов регулирования и функциональных узлов ССЭ проводилась с применением основ теории автоматического управления, методов математического моделирования. Основные расчетные соотношения получены с применением преобразований Лапласа, дифференциального и интегрального исчисления. Теоретические положения и разработанные технические решения проверялись методом имитационного моделирования в среде MATLAB.

Для достижения поставленной цели потребовалось решение следующих **взаимоувязанных научно-технических задач:**

1. Разработать многофункциональное логическое устройство сравнения (МЛУС).

2. На основе многофункционального логического устройства сравнения реализовать эффективные способы регулирования электропривода с фазовой синхронизацией с расширенным диапазоном регулирования угловой скорости.

3. Реализовать на основе МЛУС эффективные способы фазирования синхронно-синфазного электропривода.

4. Для проверки достоверности полученных результатов провести имитационное моделирование синхронно-синфазного электропривода, построенного на основе предложенных алгоритмов и способов управления, в среде MATLAB.

Научная новизна диссертационной работы в рамках сформулированных научно-технических задач заключается в следующем:

- с целью расширения функциональных возможностей логического устройства сравнения (ЛУС) и создания алгоритма работы и структуры многофункционального устройства разработаны функциональные схемы его основных элементов: схемы разделения совпадающих во времени импульсов,

формирователя сигналов изменения режима работы ЛУС, устройств для определения угловой ошибки электропривода, косвенного определения ошибки по угловой скорости и углового ускорения.

- усовершенствованы и реализованы на основе МЛУС варианты системы автоматического управления электроприводом с фазовой синхронизацией с опережающей разблокировкой импульсного частотно-фазового дискриминатора (ИЧФД) в режим фазового сравнения: с определением области ошибки по частоте вращения (коррекция длительности входных импульсов в зависимости от заданной частоты вращения) и с использованием косвенного метода измерения ошибки по угловой скорости (коррекция результата измерения в зависимости от заданной частоты вращения) для определения момента переключения ИЧФД в режим фазового сравнения;

- усовершенствованы и реализованы на основе МЛУС системы автоматического управления синхронно-синфазным электроприводом, реализующие способ предварительного фазирования ССЭ с постоянной скоростью доворота вала электродвигателя и варианты способа квазиоптимального по быстродействию фазирования.

Практическая ценность.

Практическое значение работы состоит в создании теоретических предпосылок и научно обоснованных технических решений для построения синхронно-синфазного электропривода сканирующих систем и его основных узлов.

1. Разработанный алгоритм работы многофункционального логического устройства сравнения, позволяет разрабатывать на его основе более эффективные способы управления синхронно-синфазным электроприводом и его подсистемами.

2. Использование усовершенствованных способов управления ЭПФС позволит расширить диапазон регулирования угловой скорости электропривода сканирующих систем.

3. Реализация способов фазирования на основе МЛУС позволит упростить функциональную схему электропривода и расширить возможности по реализации более эффективных способов управления ССЭ.

4. Разработана программа для исследования динамических процессов ССЭ в приложении Simulink программного пакета MATLAB.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Структура многофункционального логического устройства сравнения и его основных элементов: схемы разделения совпадающих во времени импульсов; формирователя сигналов изменения режима работы ЛУС; устройств для определения угловой ошибки электропривода, косвенного определения ошибки по угловой скорости и углового ускорения.

2. Реализованные на основе МЛУС варианты схемной реализации способа синхронизации ЭПФС с опережающей разблокировкой ИЧФД: с определением области ошибки по частоте вращения и с использованием косвенного метода измерения ошибки по угловой скорости для определения момента переключения ИЧФД в режим фазового сравнения;

3. Реализованные на основе МЛУС схемные реализации: способа предварительного фазирования ССЭ с постоянной скоростью доворота вала электродвигателя и вариантов способа квазиоптимального по быстродействию фазирования.

Достоверность результатов подтверждается корректным применением необходимого математического аппарата, качественным совпадением, достаточной сходимостью результатов имитационного моделирования и теоретического анализа; апробацией как предварительных, так и окончательных результатов диссертационной работы, полученными патентами на полезные модели и изобретения.

Реализация и внедрение результатов работы.

Результаты разработки МЛУС и моделирования ССЭ используются при подготовке инженеров по специальности 210106.65 «Промышленная электроника» и направлению 140400.62 «Электроэнергетика и электротехника» при выполнении учебной научно-исследовательской работы студентов, курсовых и дипломных проектов.

Разработанные в ходе выполнения диссертационной работы алгоритм работы и схемная реализация многофункционального логического устройства сравнения и его элементов использованы на предприятии ОАО «Центральное конструкторское бюро автоматики» при разработке систем управления с фазовой автоподстройкой частоты, что позволило сократить время их проектирования и упростить практическую реализацию разрабатываемых устройств.

Личный вклад. Постановка задач, методология их решения, основные научные результаты и положения, изложенные в диссертации, разработаны и получены автором самостоятельно.

Апробация работы. Материалы работы докладывались и обсуждались на:

1. VII и VIII Международной научно-технической конференции «Динамика систем, механизмов и машин» (Омск, 2009 г. и 2012 г.)
2. III, IV и V Всероссийской молодежной научно-технической конференции «Россия молодая: передовые технологии – в промышленность!» (Омск, 2010 г., 2011 г. и 2013 г.)
3. II Региональной научно-технической конференции «Омский регион – месторождение возможностей» (Омск, 2011 г.)
4. II и III Всероссийской научно-практической конференции «Культура, наука, образование: проблемы и перспективы» (Нижевартовск, 2013 г., 2014 г.)

Публикации.

Материалы диссертации опубликованы в 21 статье, из них 4 в изданиях из списка рекомендованных ВАК РФ, получено 8 патентов на полезные модели и изобретения, получены 2 свидетельства о регистрации алгоритмов в фонде алгоритмов и программ. В публикациях в соавторстве личный вклад соискателя составляет не менее 50%.

Структура и объём работы. Диссертационная работа содержит введение, четыре главы, основные выводы по результатам научных исследований, список литературы и приложения. Общий объём составляет 228 страниц, в том числе 132 рисунка, 2 таблицы, 145 литературных источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проводимых исследований, сформулированы цель и основные задачи работы, научная новизна и практическая значимость результатов, представлена структура диссертации и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены вопросы построения узла оптико-механической развертки сканирующей системы, реализующей метод бескадрового непрерывно-построчного сканирования (рисунок 1, а, где ФП – фотоприемник, ω_3 – угловая скорость, v – линейная скорость, α_c – угловой размер, $\Delta\alpha_c$ – угловой размер элемента разложения по строке, $\Delta\alpha_k$ – угловая разрешающая способность, h – расстояние до поверхности изображения), и синхронно-синфазного электропривода, обеспечивающего вращение призмы сканирующей системы с заданной угловой скоростью (рисунок 1, б, где БЗЧ – блок задания частоты, БОУР – блок определения углового рассогласования, БР – блок регулирования, ФР – фазирующий регулятор, КУ – корректирующее устройство, ЭД – электродвигатель. ФАПЧВ – фазовая автоподстройка частоты вращения, ИДЧ – импульсный датчик частоты, ДП – датчик положения, БИД – блок импульсных датчиков).

На основе анализа показателей назначения узла ОМР и требований к электроприводу сканирующей системы выбрано направление исследований, связанное с обеспечением широкого диапазона регулирования ССЭ по частоте вращения и упрощением схемной реализации системы автоматического управления. Определена целесообразность разработки МЛУС с расширенными функциональными возможностями путем интеграции и увеличения количества функций ЛУС и БОУР для обеспечения возможности усовершенствования и разработки новых высокоэффективных способов регулирования ЭПФС и ССЭ. Выявлены научно-технические задачи, требующие исследования.

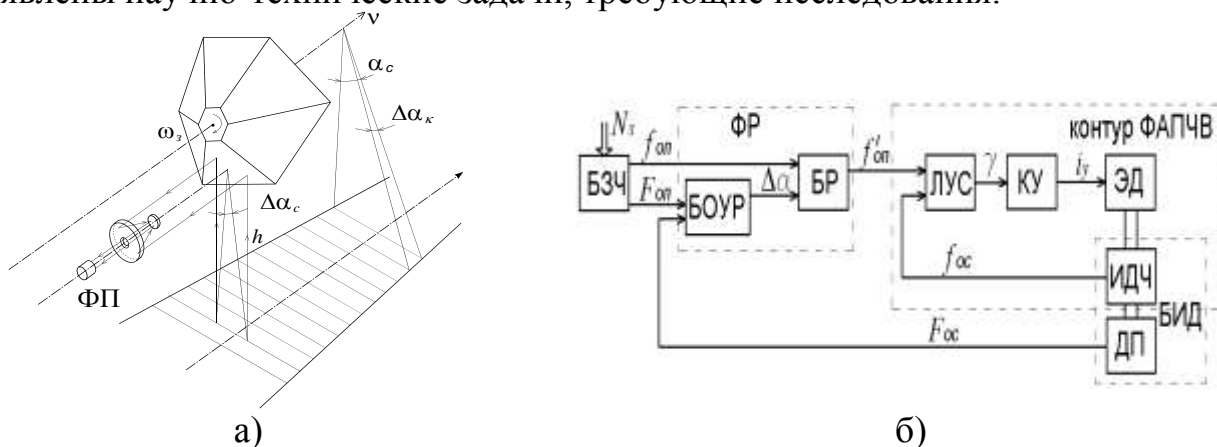


Рисунок 1 Обзорно-поисковая система, реализующая метод бескадрового непрерывно-построчного сканирования и функциональная схема ССЭ

Во второй главе проанализированы структуры ЛУС, БОУР и варианты их реализаций с целью определения направлений расширения их функциональных возможностей и создания на их основе многофункционального логического устройства сравнения.

Основу ЛУС составляет импульсный частотно-фазовый дискриминатор (ИЧФД), функциональная схема которого представлена на рисунке 2, а, где ФД – фазовый дискриминатор, ЧД – частотный дискриминатор, СЛБ – схема логической блокировки. Фазовый дискриминатор предназначен для определения фазового рассогласования входных частотных сигналов f_{on} и f_{oc} и может быть выполнен на основе RS -триггера. Частотный дискриминатор используется для определения разности сравниваемых частот, и обычно реализуется в ИЧФД на основе алгоритма сравнения периодов входных сигналов в моменты прихода двух импульсов одной их сравниваемых частот между двумя соседними импульсами другой частоты. Схема логической блокировки позволяет организовать три режима работы ИЧФД: режим насыщения P ($\gamma = 1$ при $f_{on} > f_{oc}$), режим фазового сравнения Π ($\gamma = \Delta\varphi$ при $f_{on} \approx f_{oc}$) и режим насыщения T ($\gamma = 0$ при $f_{on} < f_{oc}$). Работа поясняется с помощью временных диаграмм, представленных на рисунке 2, б.



Рисунок 2 - Обобщенная функциональная схема и временные диаграммы работы ИЧФД

Рассмотренный алгоритм работы ЧД реализуется в достаточно простой схеме ИЧФД, что обуславливает его широкое применение в системе ФАПЧ, но его недостатком является значительная величина временного интервала формирования информации о результатах сравнения частот. Анализ работы ИЧФД в контуре ФАПЧ показывает, что такая временная задержка сказывается на работе контура ФАПЧ на интервале от момента достижения его выходным сигналом заданной частоты до момента перехода ИЧФД в режим фазового сравнения. В этом случае максимальное перерегулирование по угловой скорости не превышает $\Delta\omega_r = \sqrt{2\varphi_0 \varepsilon_m}$, где ε_m – максимальное ускорение.

Частотный дискриминатор обычно реализуется на основе счетчика импульсов (реверсивного или суммирующего со сбросом), поэтому при одновременном приходе входных импульсов ИЧФД возможны сбои в алгоритме работы ЧД. Для устранения данного недостатка разработана схема разделения совпадающих во времени импульсов на основе RS -триггера, используемого в качестве распределителя входных импульсов (рисунок 3, где ЭЗ – элемент задержки, ФИ – формирователь импульсов). В результате один из одновременно пришедших импульсов сдвигаются на определенный временной интервал.

В работе проведен анализ известных схем ИЧФД с целью определения решаемых ими функциональных задач и определения направлений расширения функциональных возможностей дискриминатора. Классификация известных схем ИЧФД по функциональным признакам приведена в таблице 1.

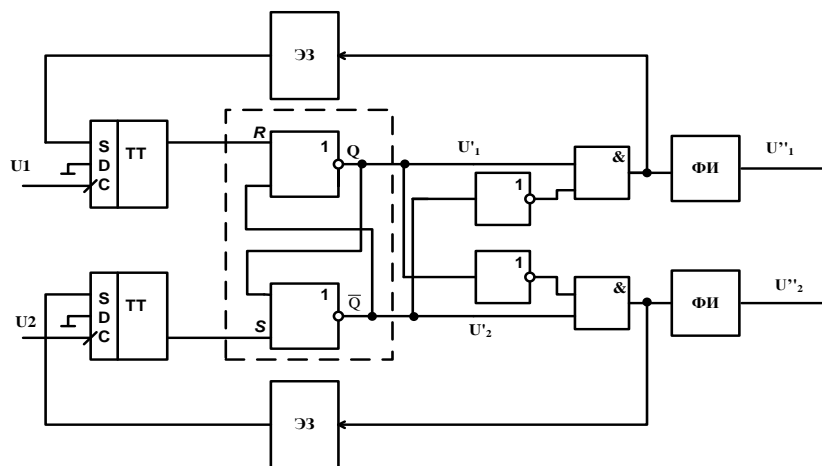


Рисунок 3 Функциональная схема устройства для разделения совпадающих импульсов

Таблица 1.

Классификация известных схем ИЧФД по функциональным признакам

Реализация формирователя сигнала фазовой ошибки на основе:	Наличие формирователя сигналов индикации моментов времени прихода 0 или 2 импульсов частоты обратной связи между двумя соседними импульсами задающей частоты (0/2 и 2/2)	Наличие формирователя сигнала индикации режима работы ИЧФД (Р, П или Т) на основе блокирующих триггеров
1. ФД	А.с. № 484621, Патент № 2469461 есть	А.с. № 484621, Патент № 2469461 есть
2. БФС в виде суммирующего двухразрядного счетчика импульсов с коэффициентом пересчета $k_{сч} = 3$	Патент № 2428785 есть	А.с. № 1589373 есть
3. БФС в виде реверсивного двухразрядного счетчика импульсов	Отсутствует	Патент № 95439 есть

Формирование в ИЧФД сигналов индикации момента изменения режима его работы (0/2 и 2/2) и индикации режимов работы (Р, П или Т) позволяет использовать дискриминатор в системах электропривода, использующих более эффективные законы управления. Схема ИЧФД на основе реверсивного двухразрядного счетчика импульсов благодаря простоте реализации наиболее широко используется при построении систем ФАПЧВ, но, как видно из третьей строки таблицы, в известных схемах отсутствует возможность формирования сигналов 0/2 или 2/2. На основе анализа алгоритма работы такого ИЧФД в работе получены логические функции для формирования данных сигналов:

$$0/2 = f_{on}(D + C * П + B * Т);$$

$$2/2 = f_{oc}(A + B * П + C * Р),$$

и на их основе разработана функциональная схема ИЧФД (рисунок 4).

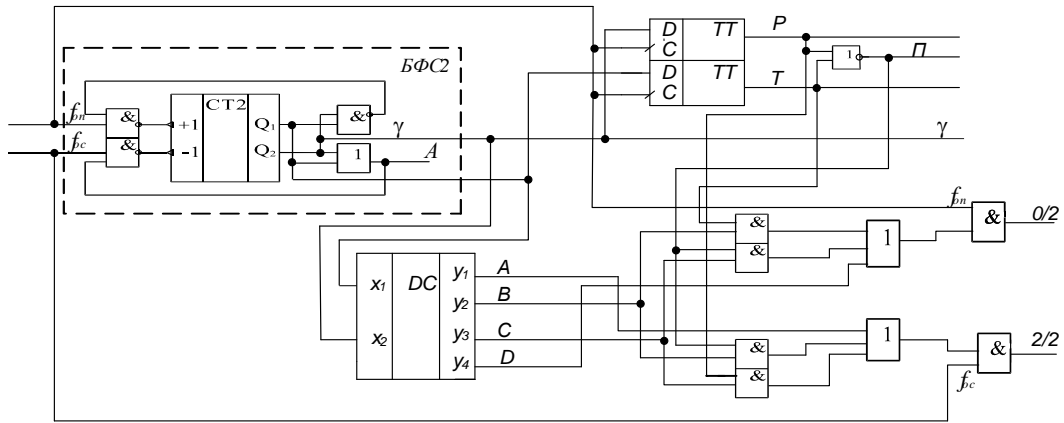


Рисунок 4 Функциональная схема ИЧФД с формированием сигналов 0/2 и 2/2

Анализ работы известных схем БОУР показал, что наиболее точные и быстродействующие устройства реализуются на основе ИЧФД с формированием сигналов 0/2 и 2/2, что определяет целесообразность объединения ЛУС и БОУР в одно МЛУС.

Целью расширения функциональных возможностей ЛУС, с учетом возможности объединения с БОУР и создания МЛУС, являлось формирование сигналов ошибки по угловой скорости и углового ускорения путем схемной реализации методов косвенного измерения данных величин. Была составлена классификация (рисунок 5) известных методов определения ошибки по угловой скорости и определены направления усовершенствования аналоговых и цифровых измерительных устройств.

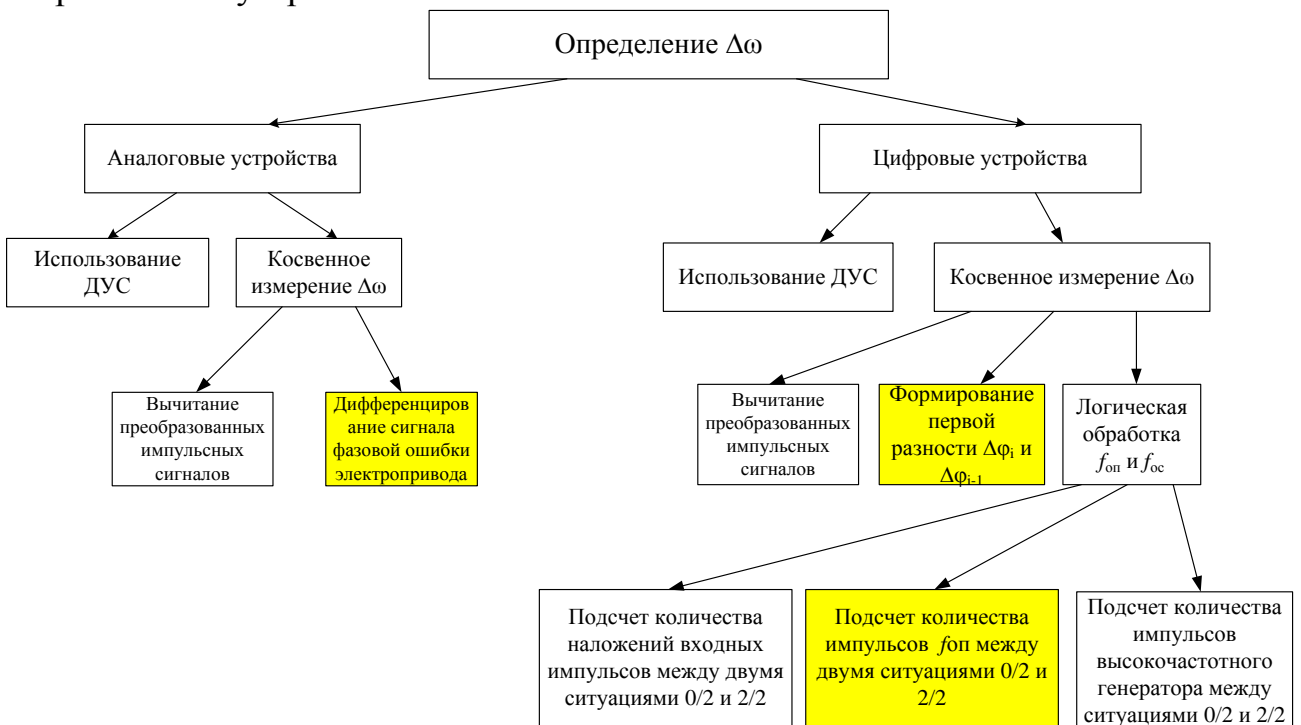


Рисунок 5 Классификация устройств для измерения ошибки по угловой скорости электропривода

В работе основное внимание уделялось разработке новых алгоритмов косвенного измерения $\Delta\omega$ путем логической обработки входных импульсных

сигналов ЛУС и их схемной реализации в аналоговой и цифровой формах. Для получения аналогового сигнала ошибки по угловой скорости электропривода был разработан ИЧФД с расширенной (до полного оборота вала электродвигателя) линейной зоной определения фазовой ошибки $\Delta\varphi_p$ (рисунок 6).

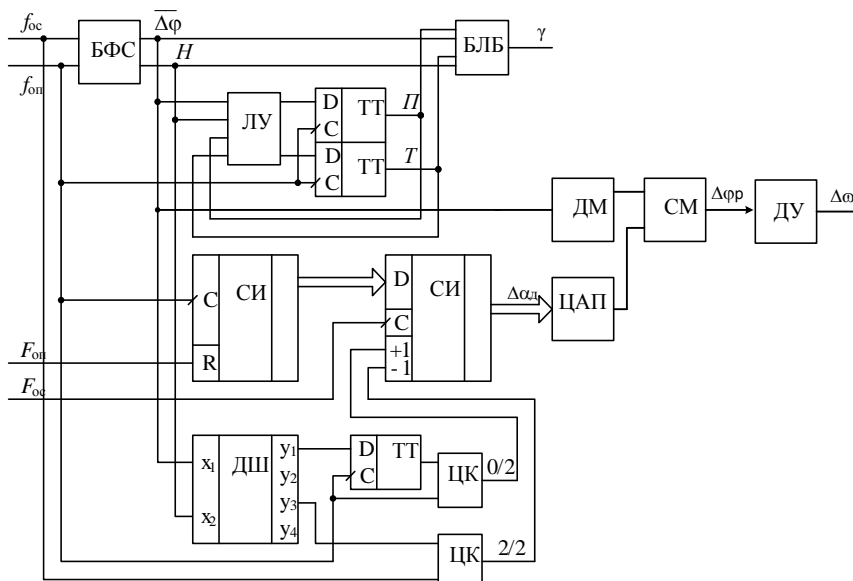


Рисунок 6 Функциональная схема ИЧФД с формированием дополнительного аналогового сигнала ошибки по угловой скорости

Для получения сигнала $\Delta\omega$ в цифровой форме в широком диапазоне регулирования угловой скорости было разработано устройство (рисунок 7), реализующее подсчет количества импульсов опорной частоты между двумя соседними ситуациями 0/2 или 2/2 и вычисляющее ошибку по угловой скорости в момент прихода импульсов 0/2 или 2/2 по формуле

$$\Delta\omega_k = \frac{2\varphi_0 - \varepsilon_m N^2 T_{оп}^2}{2NT_{оп}}$$

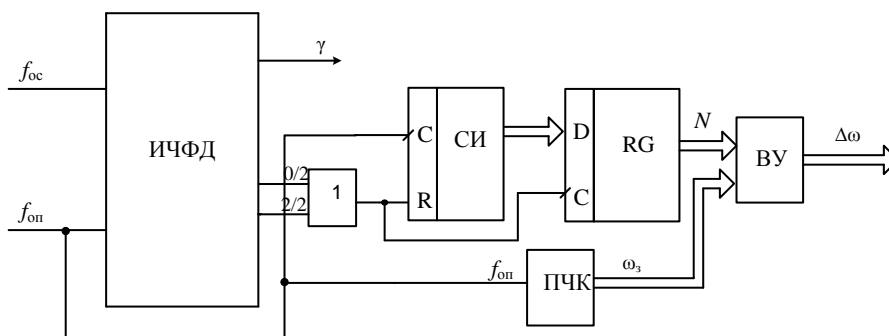


Рисунок 7 Функциональная схема устройства для косвенного определения цифрового значения ошибки по угловой скорости

На основе устройства для косвенного определения $\Delta\omega$ в цифровой форме было разработано устройство (рисунок 8) для определения углового ускорения по формуле

$$\varepsilon_p = \frac{2\varphi_0 (N_2 - N_1)}{T_{оп}^2 N_1 N_2 (N_2 + N_1)}$$

и по его полученному значению коррекции сигнала $\Delta\omega$.

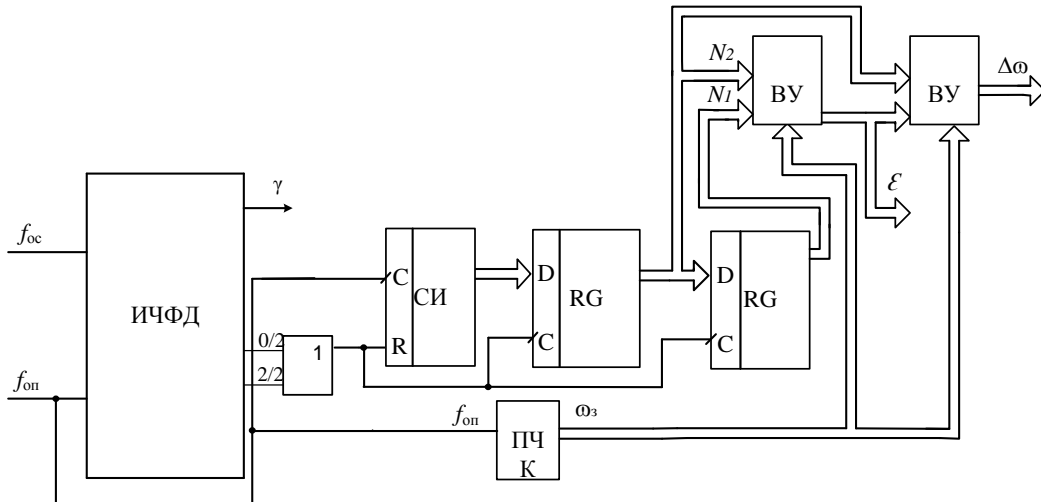


Рисунок 8 Функциональная схема устройства для определения углового ускорения

На основе проведенных разработок было создано МЛУС, реализующее рассмотренные функции и предназначенное для усовершенствования законов управления ССЭ с целью обеспечения высокой точности и быстродействия электропривода в широком диапазоне регулирования угловой скорости.

В третьей главе на основе методов теории автоматического управления для нелинейных и линейных систем усовершенствованы способы синхронизации ЭПФС с опережающей разблокировкой ИЧФД в режим фазового сравнения и способы фазирования ССЭ. Для исследования динамических процессов в электроприводе использовались математическая модель ИЧФД (рисунок 9, где НЭ – нелинейный элемент, РЭ – релейный элемент) и реализованная на ее основе структурная схема ЭПФС (рисунок 10) для области рабочих частот вращения, в которой выполняется условие линеаризации релейного элемента в ШИМ

$$f_{on} \gg T_{\phi}^{-1} / 2\pi \gg \omega_c / 2\pi.$$

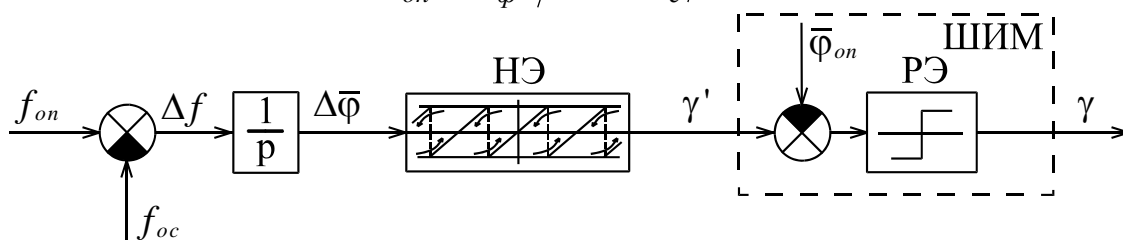


Рисунок 9 Модель логического устройства сравнения

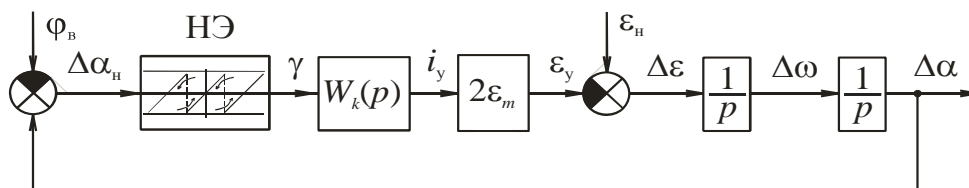


Рисунок 10 Структурная схема электропривода с фазовой синхронизацией

Для анализа влияния возмущающих воздействий (погрешность ИДЧ ϕ_B и приведенный к ускорению момент нагрузки ϵ_n электродвигателя) на статическую

точность САУ можно записать обобщенную передаточную функцию корректирующего устройства в виде

$$W_k(p) = \frac{k R(p)}{Q(p)}.$$

В этом случае передаточная функция САУ запишется в виде

$$\Delta\alpha(p) = \frac{D_\varepsilon^{-1} Q(p)}{D_\varepsilon^{-1} Q(p) p^2 + R(p)} \varepsilon_n(p) + \frac{R(p)}{D_\varepsilon^{-1} Q(p) p^2 + R(p)} \varphi_\varepsilon(p).$$

где

$$D_\varepsilon = \frac{2\varepsilon_m}{\varphi_0} k - \text{добротность электропривода по ускорению.}$$

Тогда влияние возмущающих воздействий на статическую точность САУ (при $R(0) = Q(0) = 1$) может быть описано уравнениями

$$\Delta\alpha = D_\varepsilon^{-1} \varepsilon_n = \frac{1}{k} \frac{\varphi_0}{2} \frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_m}, \quad \Delta\alpha = \varphi_\varepsilon.$$

Для гарантированного обеспечения устойчивости САУ используется модальный ПД-регулятор, обеспечивающий критический вид переходного процесса в ЭПФС в режиме фазового сравнения ИЧФД. В этом случае постоянная времени корректирующего устройства T_k и постоянная среза T_c САУ определяются из уравнений

$$T_k = 2\sqrt{D_\varepsilon^{-1}}, \quad T_c = \frac{T_k}{2} = \sqrt{D_\varepsilon^{-1}}.$$

Для анализа динамических процессов в ЭПФС (нелинейная САУ) целесообразно использовать метод фазовой плоскости (рисунок 11). В этом случае линии переключения и область начальных условий по $\Delta\omega$ (для режима разгона) описываются уравнениями

$$\Delta\alpha = \varphi_0/2 \pm n\varphi_0, \quad 0 \geq \Delta\omega > -\Delta\omega_r = -\sqrt{2\varphi_0\varepsilon_m}.$$

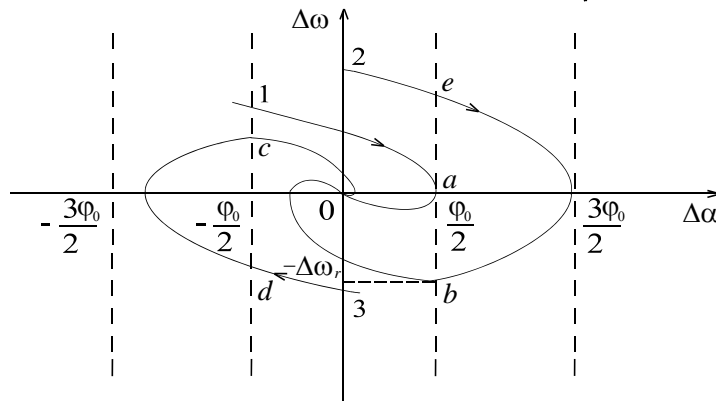


Рисунок 11 Фазовый портрет работы электропривода

Из фазового портрета видно, что при обычном алгоритме работы ИЧФД в САУ имеется перерегулирование, обусловленное значительной величиной интервала формирования импульсов 0/2 или 2/2, определяющих моменты времени изменения режима работы ИЧФД. Составлена классификация способов улучшения динамики ЭПФС (рисунок 12) и выбрано для развития направление улучшения

динамики за счет опережающей разблокировки ЛУС в режим фазового сравнения (рисунок 13).



Рисунок 12 Классификация способов улучшения динамики ЭПФС

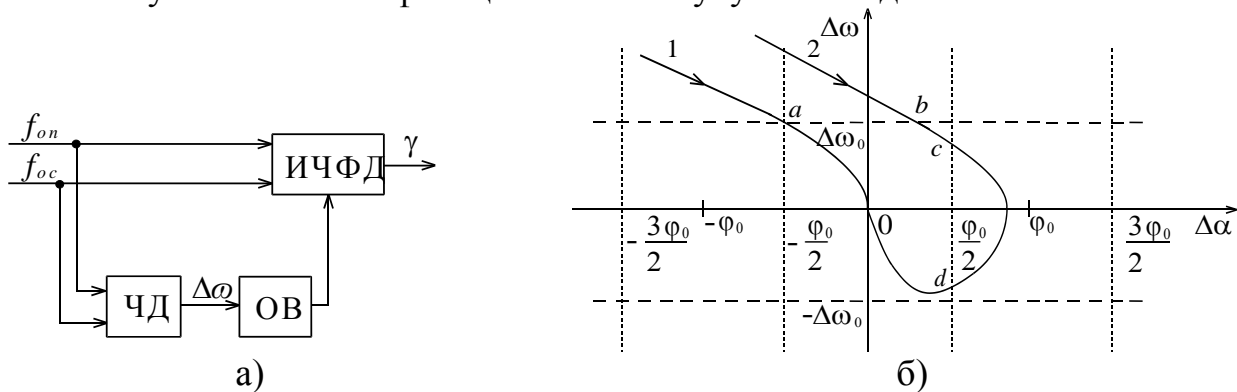


Рисунок 13 Функциональная схема ЛУС и фазовый портрет работы электропривода с опережающей разблокировкой ИЧФД

Благодаря использованию МЛУС при реализации ЭПФС были усовершенствованы схемные реализации двух вариантов способа синхронизации с опережающей разблокировкой ЛУС:

- с определением области значений $\Delta\omega$ для организации разблокировки ЛУС (рисунок 14);

- с определением значения $\Delta\omega$ для организации разблокировки ЛУС (рисунок 15).

В первом варианте для расширения диапазона регулирования ЭПФС по частоте вращения вводится коррекция длительности опорных импульсов по закону

$$\tau_{on} = \frac{\Delta\omega_r T_{on}^2}{\varphi_0},$$

а во втором – реализуется сравнение кодов, пропорциональных заданной и текущей ошибке по угловой скорости, с коррекцией их значений в зависимости от заданной частоты вращения по формуле

$$N = \frac{2\omega_s(\sqrt{2}-1)}{\Delta\omega_r} = \frac{2(\sqrt{2}-1)}{\Delta\omega_r} \omega_s.$$

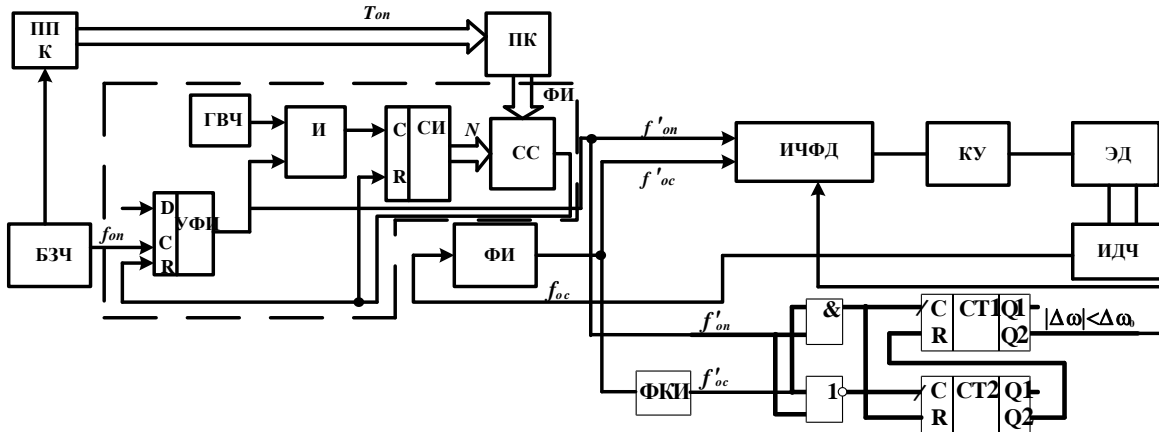


Рисунок 14 Функциональная схема ЭПФС с регулируемой длительностью импульсов $f_{оп}$

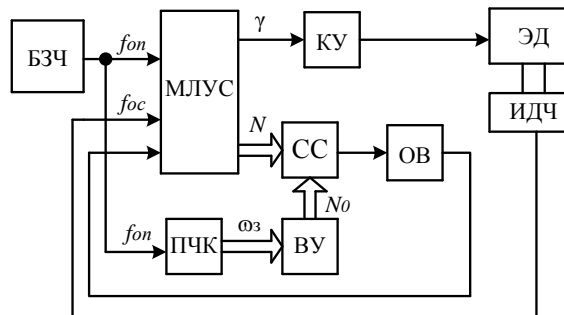


Рисунок 15 Функциональная схема ЭПФС, реализованная на основе МЛУС

Электропривод с фазовой синхронизацией решает задачи обеспечения высокой точности регулирования угловой скорости и высокого быстродействия в переходных режимах синхронизации ССЭ. Установка начального углового положения вала электродвигателя и, соответственно, призмы узла оптико-механической развертки сканирующей системы по импульсам угловой привязки осуществляется с помощью внешнего контура регулирования ССЭ (фазировочного регулятора). Классификация способов фазирования электропривода приведена на рисунке 16.

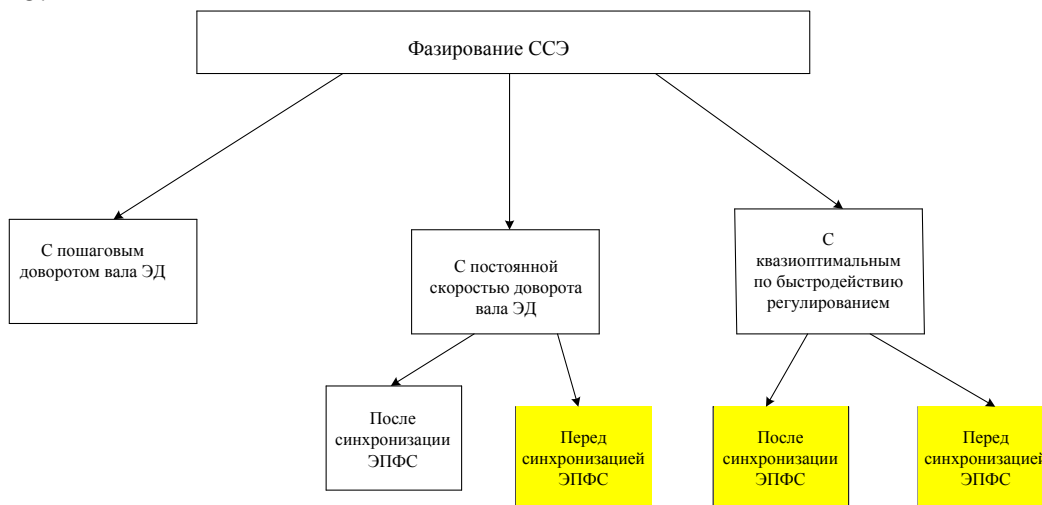


Рисунок 16 Классификация способов фазирования

Перспективными в плане обеспечения высокого быстродействия процесса фазирования являются регуляторы с постоянной скоростью доворота вала электродвигателя и квазиоптимальным по быстродействию фазированием, при этом более высокое быстродействие достигается при организации процесса фазирования до синхронизации ССЭ (предварительное фазирование).

Результаты усовершенствования способа синхронизации ЭПФС с опережающей разблокировкой ИЧФД в режим фазового сравнения были использованы при построении ССЭ, функционирующего в широком диапазоне рабочих частот вращения и реализованного на основе МЛУС. Были реализованы способ предварительного фазирования с постоянной скоростью доворота вала электродвигателя (рисунок 17) и варианты способа квазиоптимального по быстродействию фазирования, организованного после синхронизации (рисунок 18) и до синхронизации (рисунок 19) ЭПФС. Работа предложенных технических решений поясняется с помощью фазовых портретов.

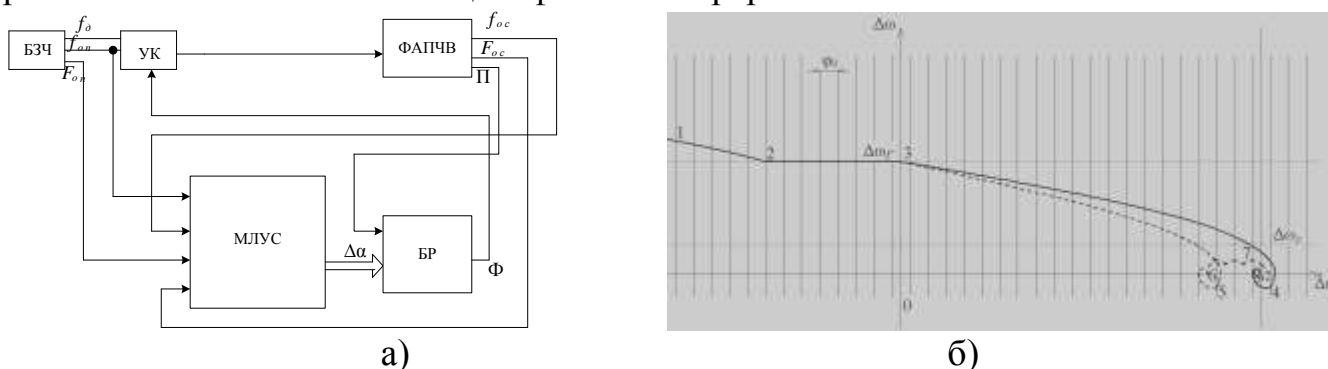


Рисунок 17 Функциональная схема и фазовый портрет работы ССЭ (вариант 1)

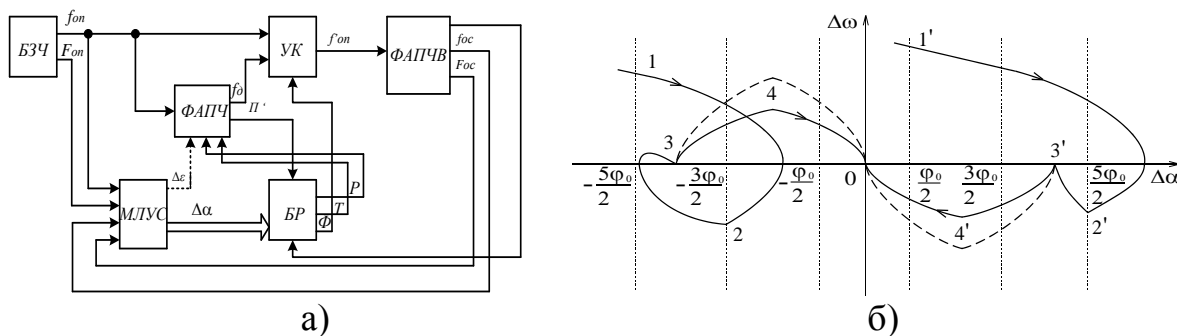


Рисунок 18 Функциональная схема и фазовый портрет работы ССЭ (вариант 2)

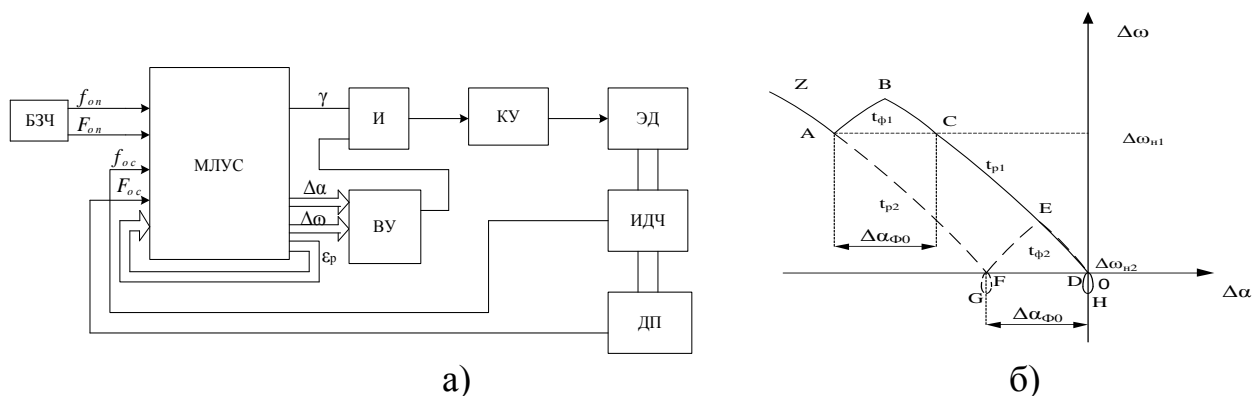


Рисунок 19 Функциональная схема и фазовый портрет работы ССЭ (вариант 3)

В квазиоптимальном по быстродействию фазирующем регуляторе предусмотрена возможность уточнения вычисленных значений ошибки по угловой скорости по результатам вычисления реального ускорения электропривода в соответствии с формулой

$$\varepsilon = \pm \frac{2\varphi_0(N_2 - N_1)}{T_{оп}^2 N_2 N_1 (N_2 + N_1)}$$

В четвертой главе разработана учитывающая импульсный характер сигналов задания и обратной связи компьютерная модель ССЭ, реализованного на основе МЛУС (рисунок 20). Для подтверждения достоверности полученных теоретических результатов проведены компьютерные исследования модели ССЭ при реализации усовершенствованных способов регулирования электропривода.

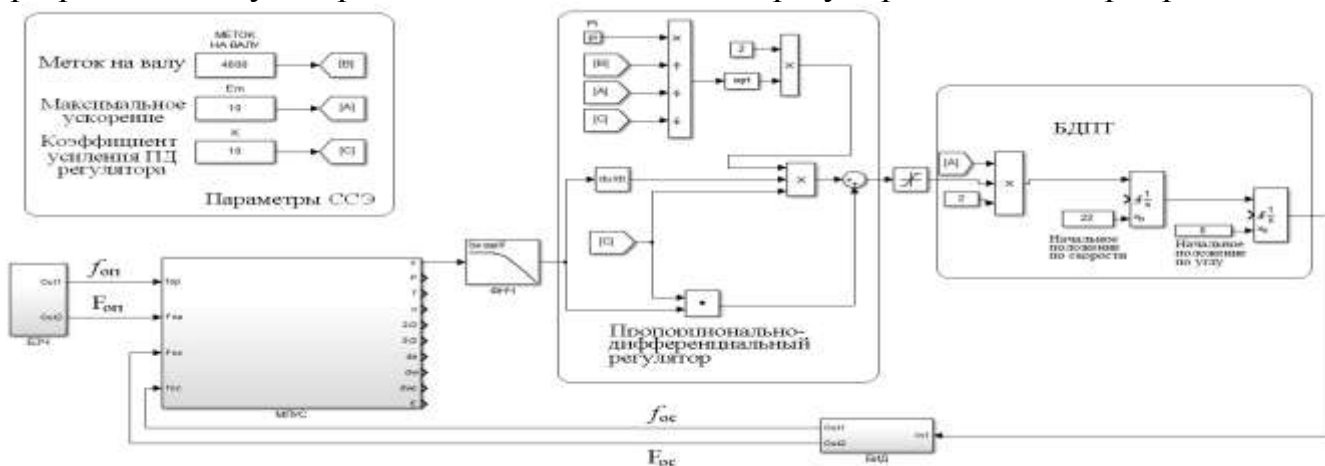


Рисунок 20 Компьютерная модель ССЭ

Результаты имитационного моделирования ЭПФС (рисунок 21) и ССЭ (рисунок 22) во всем рабочем диапазоне частот вращения электропривода подтвердили полученные в диссертационной работе теоретические результаты.

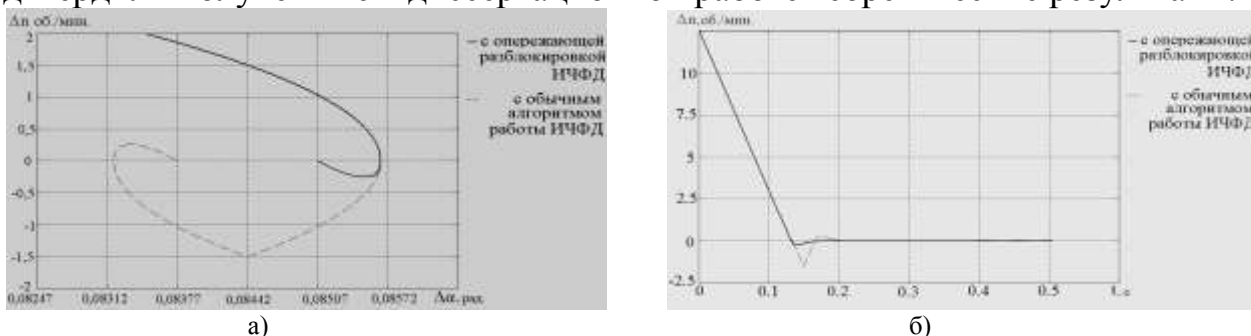


Рисунок 21 Фазовые портреты и временные диаграммы работы ЭПФС

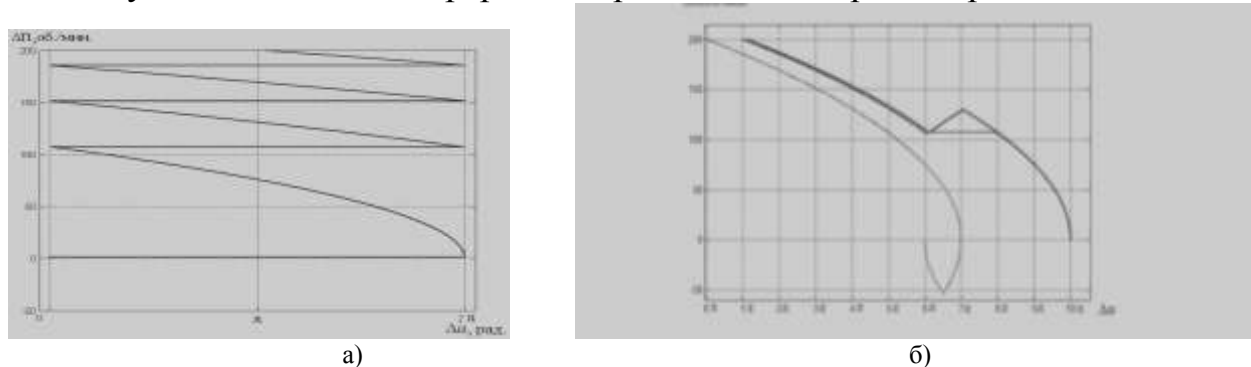


Рисунок 22 Фазовые портреты работы ССЭ

Фазовые портреты работы ССЭ поясняют способ предварительного фазирования с постоянной скоростью доворота вала электродвигателя (рисунок 22, а) и варианты способа квазиоптимального по быстродействию фазирования до синхронизации электропривода и после синхронизации (рисунок 22, б).

В **приложении** представлены акты внедрения результатов диссертационной работы, полученные патенты на полезные модели и изобретения.

Основные выводы по результатам научных исследований

Основные научные и практические результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Разработана классификация известных схем ИЧФД по функциональным признакам.

2. С целью расширения функциональных возможностей ЛУС разработаны:

- схема разделения совпадающих во времени импульсов на основе *RS*-триггера, используемого в качестве распределителя входных импульсов;

- формирователь сигналов индикации моментов времени, в которые происходят изменения режима работы ИЧФД;

- устройства для определения угловой ошибки электропривода в пределах полного оборота вала электродвигателя, косвенного определения ошибки по угловой скорости в аналоговой и цифровой формах и углового ускорения.

3. Разработано многофункциональное логическое устройство сравнения, позволяющее упростить реализацию электропривода и обеспечить возможность реализации более сложных высокоэффективных способов управления ССЭ.

4. Усовершенствованы и реализованы на основе МЛУС варианты схемной реализации способа синхронизации ЭПФС с опережающей разблокировкой ИЧФД:

- с определением области ошибки по частоте вращения для определения момента переключения ИЧФД в режим фазового сравнения;

- с использованием косвенного метода измерения ошибки по угловой скорости.

5. Усовершенствованы и реализованы на основе МЛУС схемные реализации:

- способа предварительного фазирования ССЭ с постоянной скоростью доворота вала электродвигателя.

- способа квазиоптимального по быстродействию фазирования с разделением во времени режимов синхронизации и фазирования.

- способа квазиоптимального по быстродействию предварительного фазирования с коррекцией значения измеренной косвенным методом ошибки по частоте вращения по результатам вычисления реального ускорения электропривода.

6. Разработана компьютерная модель ССЭ, позволяющая учитывать импульсный характер сигналов задания и обратной связи.

7. Результаты компьютерных исследований динамических процессов в электроприводе подтвердили достоверность результатов теоретических исследований динамики ССЭ в широком диапазоне регулирования угловой скорости и усовершенствованных способов управления электроприводом.

Список основных работ, опубликованных по теме диссертации

Статьи в периодических научных изданиях по перечню ВАК

1. Гокова, М.В. Логическое устройство сравнения для систем фазовой автоподстройки частоты / М.В. Гокова [и др.] // Омский научный вестник. Серия "Приборы, машины и технологии". – 2009. - № 3 (83). – С. 223-227.
2. Гокова, М.В. Оценка быстродействия синхронно-синфазного электропривода в режимах фазирования / М.В. Гокова [и др.] // Омский научный вестник. Серия "Приборы, машины и технологии". – 2012. - № 3 (113). – С. 248-252.
3. Гокова, М.В. Повышение качества регулирования синхронно-синфазного электропривода на основе методов косвенного измерения углового ускорения и ошибки регулирования по угловой скорости / М.В. Гокова [и др.] // Омский научный вестник. Серия "Приборы, машины и технологии". – 2013. - № 3 (123). – С. 164-169.
4. Гокова, М.В. Разработка методов косвенного измерения углового ускорения и ошибки регулирования по угловой скорости синхронно-синфазного электропривода / М.В. Гокова, А.В. Бубнов, А.Н. Чудинов // Известия Томского политехнического университета – 2013. – Т. 323, № 4: Энергетика. – С. 147-151.

Статьи в российских и иностранных изданиях, материалы международных, всероссийских и региональных конференций

5. Гокова, М.В. Логическое устройство сравнения для электропривода с фазовой синхронизацией / М.В. Гокова [и др.] // Динамика систем, механизмов и машин: Матер. VII Междунар. науч.- техн. конф. – Омск, 2009. – Кн. 1. – С. 130-134.
6. Гокова, М.В. Организация режима пошагового фазирования в синхронно-синфазном электроприводе / М.В. Гокова, А.В. Бубнов, Т.А. Бубнова // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность!: Матер. III Всеросс. молодежн. науч. – техн. конф. – Омск: 2010. – Кн. 2. – С. 11-16.
7. Гокова, М.В. Алгоритмы работы логического устройства сравнения для электропривода с фазовой синхронизацией / М.В. Гокова [и др.] // Россия молодая: технологии в промышленность! Матер. III Всерос. молодежн. науч.-техн. конф. – Омск, 2010. – Кн. 2. – С. 17-22.
8. Гокова, М.В. Сравнение способов фазирования синхронно-синфазного электропривода по быстродействию / М.В. Гокова, А.В. Бубнов, Т.А. Бубнова // Энергетика и энергосбережение: межвуз. Тематический сб. науч. тр. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2011. – С. 226-234.
9. Гокова, М.В. Сравнительный анализ способов фазирования синхронно-синфазного электропривода по быстродействию / М.В. Гокова, А.В. Бубнов, Т.А. Бубнова // Омский регион – месторождение возможностей: Матер. Науч. – техн. конф. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2011. – С. 257-259.
10. Гокова, М.В. Многофункциональное логическое устройство сравнения для синхронно-синфазного электропривода / М.В. Гокова, А.В. Бубнов, Т.А. Бубнова // Россия молодая: технологии - в промышленность! Матер. IV Всерос.

молодежн. науч.-техн. конф. с междунар. участием, 15-17 нояб. 2011 г.– Омск, 2011. – Кн. 2. – С. 24-27.

11. Гокова, М.В. Разработка алгоритмов работы логического устройства сравнения для электропривода с фазовой синхронизацией / М.В. Гокова, А.В. Бубнов, Т.А. Бубнова // Развитие социальной, экономической и промышленной сфер регионов России: сб. науч. тр. / отв. ред. В.Е. Щерба. – Омск: ОмГТУ, 2011. – С. 187-191.

12. Гокова, М.В. Повышение надежности работы логического устройства сравнения для электропривода с фазовой синхронизацией / М.В. Гокова [и др.] // Динамика систем, механизмов и машин: Матер. VIII Междунар. науч. – техн. конф. (Омск, 13-15 ноября 2012 г.) : в 5 кн. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2012. – Кн. 1. – С. 75-79.

13. Гокова, М.В. Многофункциональное логическое устройство сравнения для синхронно-синфазного электропривода / М.В. Гокова [и др.] // Динамика систем, механизмов и машин: Матер. VIII Междунар. науч. – техн. конф. (Омск, 13-15 ноября 2012 г.) : в 5 кн. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2012. – Кн. 1. – С. 79-82.

14. Гокова, М.В. Улучшение динамики электропривода сканирующих систем / М.В. Гокова, А.В. Бубнов, А.Н. Чудинов // Динамика систем, механизмов и машин: Матер. VIII Междунар. науч. – техн. конф. (Омск, 13-15 ноября 2012 г.) : в 5 кн. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2012. – Кн. 1. – С. 102-106.

15. Гокова, М.В. Повышение качества регулирования электропривода с фазовой синхронизацией / М.В. Гокова, А.В. Бубнов, А.Н. Чудинов // Динамика систем, механизмов и машин: Матер. VIII Междунар. науч. – техн. конф. (Омск, 13-15 ноября 2012 г.) : в 5 кн. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2012. – Кн. 1. – С. 110-114.

16. Гокова, М.В. Алгоритмы работы частотно-фазового дискриминатора в электроприводе с фазовой синхронизацией / М.В. Гокова, А.В. Бубнов, А.Н. Чудинов // Современные технологии в энергетике: межвуз. темат. сб. науч. тр. – Омск: ОмГТУ, 2013. – С. 15-21.

17. Гокова, М.В. Улучшение динамики электропривода с фазовой синхронизацией / М.В. Гокова, А.В. Бубнов, А.Н. Чудинов // Культура, наука, образование: проблемы и перспективы: Матер. II Всеросс. науч.- практ. конф. – Нижневартовск: 2013. Ч. V. – С. 71-74.

18. Гокова, М.В. Особенности реализации синхронно-синфазного электропривода на основе способа синхронизации с опережающей разблокировкой логического устройства сравнения / М.В. Гокова [и др.] // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность!: Матер. V Всеросс. науч. – техн. конф. с междунар. участием (Омск, 12-14 нояб. 2013 г.): в 3 кн. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2013. – Кн. 2. – С. 207-211.

19. Гокова, М.В. Особенности построения многофункционального логического устройства сравнения для синхронно-синфазного электропривода / М.В. Гокова [и др.] // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность!: Матер. V Всеросс. науч. – техн. конф. с междунар. участием (Омск, 12-14 нояб. 2013 г.): в 3 кн. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2013. – Кн. 2. – С. 215-218.

20. Гокова, М.В. Особенности формирования сигнала ошибки по угловой скорости в электроприводе с фазовой синхронизацией / Гокова М.В., Бубнов А.В.

Алпысова А.Н. // Культура, наука, образование: проблемы и перспективы: Материалы III Всеросс. науч.-практ. конф. – Нижневартовск, 2014. Ч. III. – С. 51 – 54

21. Гокова, М.В. Квазиоптимальный по быстродействию регулятор для синхронно-синфазного электропривода / М.В. Гокова, А.В. Бубнов // Актуальные вопросы энергетики: Межвуз. темат. сб. науч. тр. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2014. – С. 112 – 117

22. Пат. 113095 РФ, МПК H02P7/28. Стабилизированный электропривод / М.В. Гокова, А.В. Бубнов, А.Н. Чудинов, (РФ) – 12 с.

23. Пат. 120824 РФ, МПК H03K 5/00. Устройство для разделения двух последовательностей импульсов / М.В. Гокова, А.В. Бубнов, А.Н. Чудинов (РФ) – 2 с.

24. Пат. 2485665 РФ, МПК H02P5/00, H02P5/46, H02P6/06. Синхронно-синфазный электропривод / М.В. Гокова, А.В. Бубнов, А.Н. Чудинов, (РФ) – 16 с.

25. Пат. 134375 РФ, МПК H03D 13/00. Частотно-фазовый дискриминатор / М.В. Гокова, А.В. Бубнов, В.А. Емашов, А.Н. Чудинов (РФ) – 2 с.

26. Пат. 136656 РФ, МПК H03D 13/00. Частотно-фазовый дискриминатор / М.В. Гокова, А.В. Бубнов, А.Н. Алпысова, А.Н. Чудинов (РФ) – 2 с.

27. Пат. 140482 РФ, МПК H03D 13/00. Импульсно-фазовый дискриминатор / М.В. Гокова, А.В. Бубнов, А.Н. Алпысова, А.М. Дайнович, А.Н. Чудинов (РФ) – 2 с.

28. Пат. 145048 РФ, МПК H02P 5/00, H02P 5/50. Устройство для согласования углового положения синхронно-вращающихся валов электродвигателей постоянного тока / М.В. Гокова, А.В. Бубнов, А.Н. Чудинов, (РФ) – 2 с.

29. Пат. 145335 РФ, МПК H02P 7/06, H02P 7/285, G05B 11/30. Устройство для фазирования вращающегося вала электродвигателя / М.В. Гокова, А.В. Бубнов, В.А. Емашов, А.Н. Чудинов, (РФ) – 2 с.

30. Гокова, М.В. Алгоритм работы многофункционального логического устройства сравнения для синхронно-синфазного электропривода / М.В. Гокова // М.: ВНИИЦ, 2013. - № 50201351216.

31. Гокова, М.В. Алгоритм программы для моделирования синхронно-синфазного электропривода / М.В. Гокова, А.В. Бубнов, А.Н. Алпысова, А.Н. Чудинов// М.: ВНИИЦ, 2013. - № 50201351219.

Личный вклад. В работах, опубликованных в соавторстве лично соискателю принадлежит в: [1, 5, 7, 10, 11, 12, 13, 16, 19, 23, 25, 26, 27] – расширение функциональных возможностей ИЧФД и формирование МЛУС; [3, 4, 15, 17, 18, 20, 22] – усовершенствование и реализация на основе МЛУС вариантов способа регулирования ЭПФС с опережающей разблокировкой ИЧФД в режим фазового сравнения; [2, 6, 8, 9, 14, 21, 24, 28, 29, 31] – усовершенствование и реализация на основе МЛУС способов фазирования ССЭ (с постоянной скоростью доворота вала электродвигателя и с квазиоптимальным по быстродействию фазированием).

