

На правах рукописи

ЧУДИНОВ Александр Николаевич

УЛУЧШЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА РЕГУЛИРОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОПРИВОДА СКАНИРУЮЩИХ СИСТЕМ

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Омск – 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Омский государственный технический университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент Бубнов Алексей Владимирович

Официальные оппоненты: Симаков Геннадий Михайлович, доктор технических наук, профессор, Новосибирский государственный технический университет, кафедра ЭАПУ, профессор

Харламов Виктор Васильевич, доктор технических наук, профессор, Омский государственный университет путей сообщения, кафедра ЭМиОЭ, профессор

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия», г. Омск

Защита диссертации состоится «24» мая 2012 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.04 при ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630092 РФ, г. Новосибирск, пр. К.Маркса 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета.

Автореферат разослан « » апреля 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Нейман В.Ю.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Синхронно-синфазные электроприводы (ССЭ) находят широкое применение в сканирующих системах и устройствах, в системах технического зрения современных робототехнических комплексов, установках фототелеграфной и видеозаписывающей аппаратуры, копировальных установках, что обусловлено их высокими точностными показателями и широким диапазоном регулирования угловой скорости.

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, Б. М. Ямановский, В. Г. Кавко, А. В. Бубнов и др. На этой основе спроектировано значительное количество электроприводов для различных областей применения, разработаны новые способы регулирования и новые технические решения построения ССЭ.

Несмотря на широкое использование принципа фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) при построении прецизионных систем электропривода вопросы динамики таких систем рассмотрены недостаточно полно, что обусловлено наличием целого ряда нелинейностей в модели электропривода, отражающих алгоритмы работы логического устройства сравнения (ЛУС) и токоограничения бесконтактного двигателя постоянного тока (БДПТ). Динамика существующих ССЭ определяется алгоритмом работы ЛУС и используемым принципом разделения во времени процессов синхронизации и фазирования, обусловленным отсутствием измерительных преобразователей ошибки по угловой скорости, функционирующих с высокой точностью в широком диапазоне частот вращения электропривода. Не решен вопрос уменьшения величины перерегулирования и сокращения времени переходного процесса при переходе к фазовой синхронизации из режима сравнения частот, что обусловлено многозначной логической нелинейностью характеристик ЛУС. Использование дополнительных технических средств ускорения перехода к фазовому режиму не имеет в настоящее время однозначного решения и ведет к значительному усложнению системы.

Настоящая работа выполнена в рамках Аналитической ведомственной целевой программы Минобрнауки России «Развитие научного потенциала высшей школы», проекты № 2.1.2/4475 и № 2.1.2/11230 «Исследование динамики и разработка новых способов регулирования синхронно-синфазного электропривода для обзорно-поисковых систем».

Цель диссертационной работы – Целью работы является улучшение показателей качества регулирования синхронно-синфазного электропривода (ССЭ) узла оптико-механической развертки сканирующей системы, что позволяет уменьшить потери информации в переходных режимах работы электропривода.

Для достижения указанной цели в диссертационной работе поставлены следующие задачи:

1) разработать способ определения ошибки по угловой скорости, функционирующий с высокой точностью в широком диапазоне частот вращения электропривода;

2) усовершенствовать способ синхронизации ССЭ с опережающей разблокировкой логического устройства сравнения, обеспечив надежную работу во всем используемом диапазоне частот вращения электропривода;

3) разработать способ фазирования ССЭ до синхронизации электропривода на заданной частоте вращения, обеспечивающий повышение быстродействия;

4) осуществить проверку разработанных способов методом имитационного моделирования, путем разработки и исследования компьютерной модели синхронно-синфазного электропривода в программном пакете MATLAB.

Методы исследования. При теоретическом исследовании режима синхронизации электропривода использовался метод фазовой плоскости. Применялся модальный метод синтеза систем. Разработка алгоритмов работы и средств построения функциональных узлов ССЭ проводилась с применением основ теории автоматического управления, теории цепей, теории электрических машин, 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.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Способы косвенного определения ошибки по угловой скорости в режимах насыщения логического устройства сравнения.

2. Алгоритм работы импульсного частотно-фазового дискриминатора (ИЧФД) с расширенными функциональными возможностями (индикация режимов работы, определение момента времени прохождения двух импульсов одной из сравниваемых частот между двумя соседними импульсами другой частоты, возможность принудительного перевода импульсного частотно-фазового дискриминатора в режим фазового сравнения) и с повышенной за счет синхронизации работы триггеров надёжностью работы.

3. Способ синхронизации ССЭ с опережающей разблокировкой логического устройства сравнения, реализованный с использованием косвенного определения ошибки по угловой скорости.

4. Способ предварительного фазирования ССЭ с постоянной скоростью доворота вала электродвигателя.

Научная новизна работы.

1. Разработаны способы косвенного определения ошибки по угловой скорости в режимах насыщения логического устройства сравнения, путем логического анализа взаимного порядка следования импульсов опорной частоты и частоты обратной связи, что позволяет реализовать новые эффективные способы управления ССЭ.

2. Разработан алгоритм работы импульсного частотно-фазового дискриминатора с расширенными функциональными возможностями (индикация режимов работы, определение момента времени прохождения двух импульсов одной из сравниваемых частот между двумя соседними импульсами другой частоты, возможность принудительного перевода импульсного частотно-фазового дискриминатора в режим фазового сравнения) и с повышенной за счет синхронизации работы триггеров надёжностью работы.

3. Усовершенствован способ синхронизации ССЭ с опережающей разблокировкой логического устройства сравнения, за счет учета в законе управления ошибки по угловой скорости определяемой косвенным способом.

4. Разработан способ предварительного фазирования ССЭ с постоянной скоростью доворота вала электродвигателя, путем синхронизации и устранения угловой ошибки на дополнительной опорной частоте, обеспечивающий значительное снижение перерегулирования по частоте вращения и снижение времени переходного процесса синхронно-синфазного электропривода.

Практическая ценность работы.

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

1. Результаты сравнительного анализа способов регулирования электропривода с фазовой синхронизацией (ЭПФС) и алгоритмов работы его отдельных узлов позволяют в зависимости от предъявляемых к электроприводу технических требований выбрать наиболее подходящие схемные решения.

2. Разработанный алгоритм работы импульсного частотно-фазового дискриминатора с расширенными функциональными возможностями, позволяет разрабатывать на его основе сложные более эффективные способы управления синхронно-синфазным электроприводом.

3. Разработаны алгоритмы работы частотного дискриминатора, позволяющие уменьшить величину перерегулирования и время переходного процесса при переходе к фазовой синхронизации из режима сравнения частот.

4. Разработана схема фазирующего регулятора, обеспечивающая значительное снижение перерегулирования по частоте вращения и уменьшения максимального времени фазирования, что позволяет уменьшить потери информации о сканируемом объекте.

5. Разработана компьютерная модель ИЧФД, позволяющая проводить исследования ССЭ методом имитационного моделирования в приложении Simulink программного пакета Matlab.

Реализация результатов работы.

Алгоритмы работы компьютерных моделей основных логических блоков синхронно-синфазного электропривода: импульсного частотно-фазового дискриминатора (№ 50201000460 ВНИИЦ) и дополнительных частотных дискриминаторов, и разработанная на их основе компьютерная модель синхронно-синфазного электропривода применяется в учебном процессе Омского государственного технического университета (ОмГТУ) при подготовке инженеров, бакалавров, магистров энергетического института ОмГТУ.

Алгоритмы работы импульсного частотно-фазового дискриминатора, частотного дискриминатора, фазирующего регулятора реализующего способ предварительного фазирования с постоянной скоростью доворота вала электродвигателя использованы в ОАО “Высокие Технологии” при разработке электроприводов.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

- VII Международной научно-технической конференции «Динамика систем, механизмов и машин», г. Омск, в 2009 г.;
- III Всероссийской научно-технической конференции «Россия молодая : передовые технологии – в промышленность», г. Омск, в 2010 г.;
- IV Всероссийской научно-технической конференции «Россия молодая : передовые технологии – в промышленность», г. Омск, в 2011 г.;
- научных семинарах кафедры.

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 14 научных работ, в том числе: 4 научных статьи в рецензируемых изданиях, входящих в перечень рекомендованных ВАК РФ, 1 статья в сборнике научных трудов, 5 публикаций в сборниках трудов научно-технических конференций, 3 программы для ЭВМ, зарегистрированные в фонде алгоритмов и программ и 1 патент на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемой литературы из 96 наименований и приложений. Работа выполнена на 179 страницах основного текста, включая 98 рисунков и 5 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и основные задачи работы, характеризуется научная новизна и практическая ценность результатов исследований.

В первой главе рассмотрены принципы построения сканирующих систем, определены области применения оптико-механических сканирующих систем. На основе анализа показателей назначения узла оптико-механической развертки и требований к используемому в нем электроприводу сделан вывод о целесообразности применения в качестве электропривода узла ОМР синхронно-синфазного электропривода.

Синхронно-синфазный электропривод реализуется в виде двух контуров регулирования (рис. 1):

- фазовой автоподстройки частоты вращения (ФАПЧВ) реализованный на основе электропривода с фазовой синхронизацией и включающий в себя логическое устройство сравнения (ЛУС), корректирующее устройство (КУ), электродвигатель (ЭД) и импульсный датчик частоты вращения (ИДЧ);
- фазирования включающий в себя контур ФАПЧВ, импульсный датчик положения (ДП), и фазирующий регулятор (ФР) состоящий из блока

определения углового рассогласования (БОУР) и блока регулирования угловой ошибки (БР).

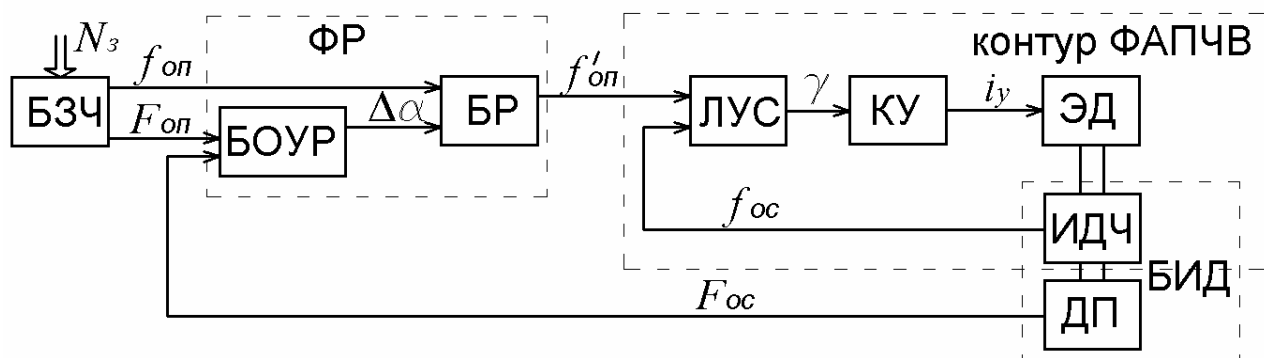


Рис. 1. Обобщенная функциональная схема синхронно-синфазного электропривода

Контур ФАПЧВ строится на основе принципа фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), который заключается в автоматическом регулировании выходной частоты замкнутой системы автоматического управления (САУ) при частотном сигнале задания.

Устойчивость САУ обеспечивается с помощью корректирующего устройства.

Контур фазирования обеспечивает установку начального углового положения (фазирование) вала электродвигателя.

Угловое расстояние между положениями метки ДП и измерительного элемента ДП в момент прихода импульса $F_{оп}$ является угловой ошибкой электропривода и определяется соотношением [3]

$$\Delta\alpha = \varphi_0 n + \Delta\alpha_1,$$

где $n = 0, 1, 2, \dots, z - 1$; $\Delta\alpha_1$ – ошибка регулирования угла электропривода, φ_0 – угловое расстояние между соседними метками ИДЧ. Первое слагаемое обусловлено наличием z линейных зон ЛУС. Фазирование заключается в довороте вала ЭД на целое число делений ИДЧ для устранения этой составляющей угловой ошибки.

С учетом требований к электроприводу сканирующих систем сделан вывод о необходимости улучшения показателей качества регулирования синхронно-синфазного электропривода, с целью уменьшения потерь информации при перестройке частоты вращения и отработки начального углового рассогласования, что определило дальнейшие исследования, результаты которых приведены в последующих главах.

Во второй главе проведен сравнительный анализ способов регулирования ССЭ и работы его основных узлов. В известных ССЭ реализуется алгоритм последовательной стыковки во времени процессов синхронизации и фазирования, что позволяет исследовать динамику ССЭ отдельно на участках синхронизации и фазирования.

Среди рассмотренных способов синхронизации электропривода наиболее эффективными в плане повышения быстродействия можно выделить способ автоматического фазирования и способ с опережающей разблокировкой ИЧФД.

При этом способ автоматического фазирования приводит к значительному снижению точности регулирования угла поворота электродвигателя, что делает непригодным его применение в ССЭ узла ОМР. Использование способа с опережающей разблокировкой ИЧФД при разработке ССЭ связано с отсутствием возможности точного определения ошибки по частоте вращения в широком диапазоне частот вращения электропривода существующими измерительными преобразователями. Для уменьшения времени синхронизации наиболее перспективным направлением является усовершенствование способов регулирования ССЭ с опережающей разблокировкой ИЧФД.

Известные способы фазирования реализуют алгоритм последовательной стыковки процессов – сначала синхронизации, затем фазирования, что не позволяет обеспечить максимально высокие динамические показатели регулирования электропривода, поэтому для снижения величины перерегулирования и уменьшения времени регулирования перспективным является разработка способов регулирования ССЭ с включением внешнего фазирующего контура до момента начала фазовой синхронизации электропривода. На рис. 2 представлен обобщенный фазовый портрет работы ССЭ, где участок фазовой траектории до точки 1 соответствует синхронизации, а участок 1-0 – начальной установке углового положения вала электропривода.

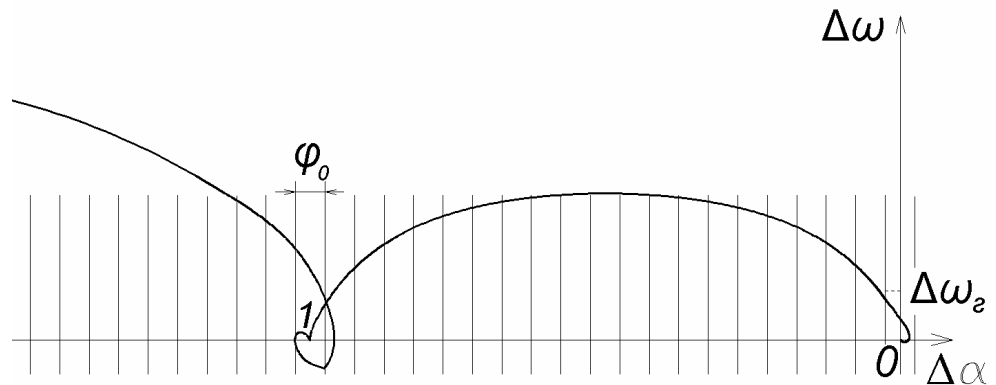


Рис. 2. Обобщенный фазовый портрет работы синхронно-синфазного электропривода

В третьей главе с целью повышения надежности работы логического устройства сравнения усовершенствован алгоритм работы ИЧФД с индикацией режимов работы электропривода. Функциональная схема ИЧФД, разработанного на основе усовершенствованного алгоритма, приведена на рис.3(ОВ – одновибратор, ЭЗ – элемент задержки).

С целью расширения диапазона работы электропривода усовершенствован способ синхронизации с опережающей разблокировкой импульсного частотно-фазового дискриминатора по сигналу дополнительного частотного дискриминатора, за счет поддержания значения длительности опорных импульсов равным

$$\tau_{on} = \frac{\Delta\omega_2 T_{on}^2}{\varphi_0},$$

при $\tau_{on} \gg \tau_{oc}$, где $\Delta\omega_2 = \sqrt{2\varepsilon_m \varphi_0}$.

Для поддержания значения длительности опорных импульсов разработана функциональная электрическая схема регулятора длительности импульсов опорной частоты (рис. 4).

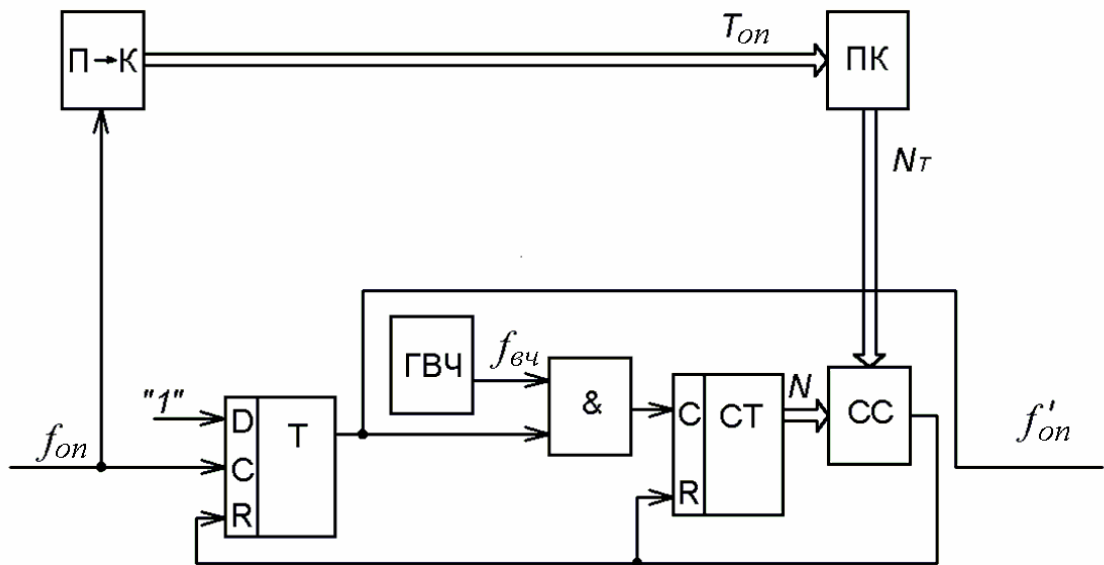


Рис. 4. Функциональная электрическая схема регулятора длительности импульсов опорной частоты

Разработаны два способа косвенного определения ошибки по частоте вращения для использования в синхронно-синфазном электроприводе, с широким диапазоном регулирования угловой скорости, отличающиеся алгоритмом логической обработки взаимного порядка следования импульсов опорной частоты и частоты обратной связи.

Первый способ основан на подсчете количества N повторяющихся во времени ситуаций совпадения входных импульсов ЧД (рис.5).

В момент первого несовпадения величина ошибки по угловой скорости будет равна:

$$\Delta\omega_k = \frac{2\varepsilon_m\varphi_0\sigma - (N\varepsilon_m T_{on})^2}{2N\varepsilon_m T_{on}}$$

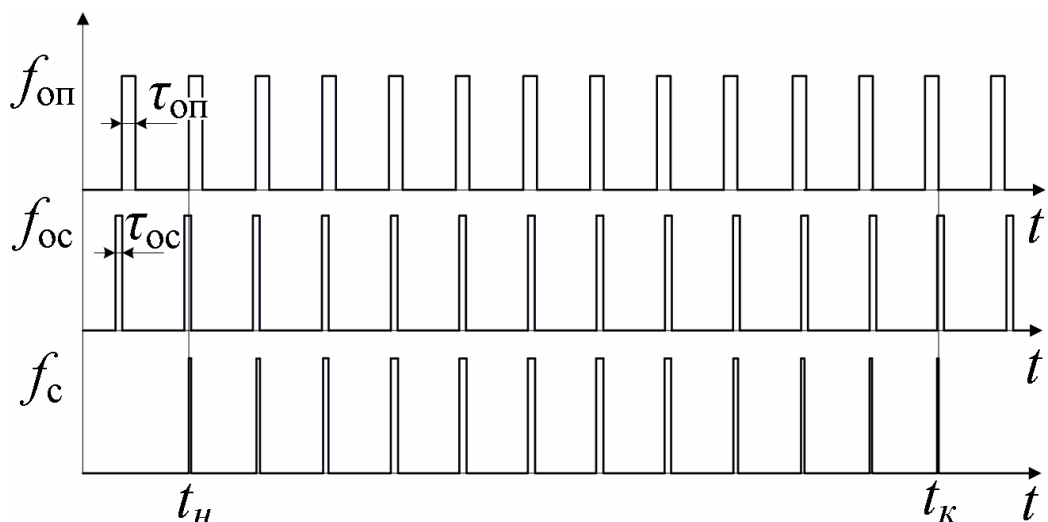


Рис. 5. Временные диаграммы работы частотного дискриминатора

Второй способ заключается в подсчете количества импульсов высокочастотного генератора между ситуациями прохождения двух импульсов одной частоты между двумя импульсами другой частоты, что соответствует прохождению изображающей точкой значений $\Delta\alpha = \pm(n\varphi_0 + \varphi_0 / 2)$ на фазовом портрете разгона синхронно-синфазного электропривода (рис. 6).

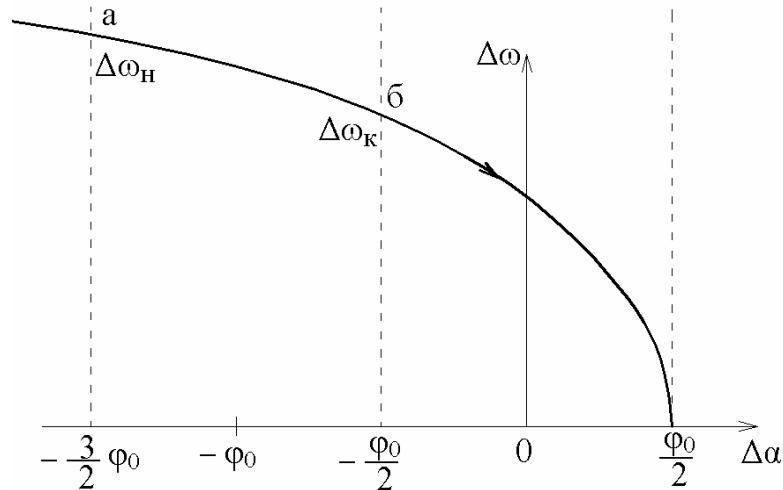


Рис. 6. Фазовый портрет разгона синхронно-синфазного электропривода

В точке б на фазовом портрете величина ошибки по угловой скорости будет равна:

$$\Delta\omega_{\kappa} = \frac{\varphi_0}{N \cdot T_{вч}} - \varepsilon_m \frac{N \cdot T_{вч}}{2},$$

где $T_{вч}$ – период импульсов высокочастотного генератора.

Разработаны алгоритмы работы и функциональные схемы частотного дискриминатора (рис. 7, рис. 8, где П→К – преобразователь период-код, Д→К – преобразователь длительность-код, RG – регистр, СС – схема сравнения, СТ – счетчик импульсов, ВУ – вычислительное устройство, ГВЧ – генератор высокой частоты), входящего в состав логического устройства сравнения, реализованные на основе способов косвенного определения ошибки по угловой скорости и позволяющие повысить надежность работы логического устройства сравнения, уменьшить перерегулирование по частоте вращения и время синхронизации ССЭ.

В функциональной электрической схеме изображенной на рис. 8

$$N_p = \frac{(2 + \sqrt{2})}{T_{вч}} \sqrt{\frac{\varphi_0}{\varepsilon_m}},$$

что соответствует значению ошибки по угловой скорости равной:

$$\Delta\omega_{\varepsilon} = \sqrt{2\varepsilon_m\varphi_0}.$$

Разработаны способ и функциональная схема предварительного фазирования с постоянной скоростью доворота вала электродвигателя, обеспечивающие повышение быстродействия и уменьшение перерегулирования по угловой скорости ССЭ.

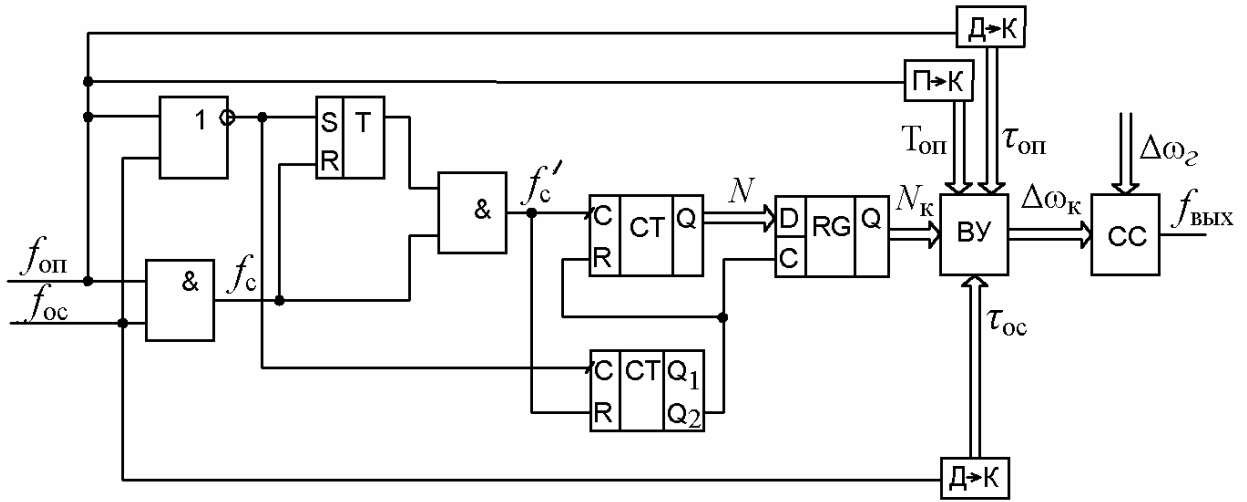


Рис. 7. Функциональная электрическая схема частотного дискриминатора на основе первого способа

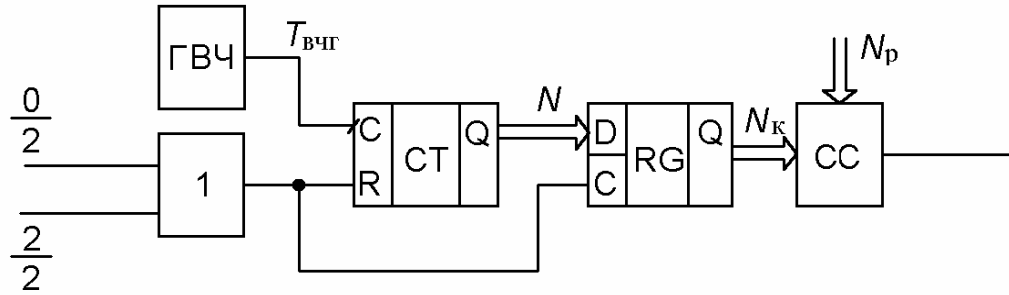


Рис. 8. Функциональная электрическая схема частотного дискриминатора на основе второго способа

Способ заключается в предварительной синхронизации (точка 2 фазового портрета рис. 9) и предварительном фазировании (участок 2-3 фазовой траектории рис. 9) электропривода на дополнительной частоте $f_{\delta} = f_{оп} - \Delta f_{\Gamma}$, при этом

$$\Delta f_{\Gamma} = \frac{\Delta \omega_{\Gamma} \cdot z}{2\pi},$$

где $\Delta \omega_{\Gamma} = \sqrt{2\Delta \alpha_0 \varepsilon_m} = \sqrt{4\pi \varepsilon_m}$ – ошибка по угловой скорости электродвигателя, при которой в случае переключения электродвигателя в режим разгона с максимальным ускорением, за время разгона электродвигателя до опорной частоты $f_{оп}$ фазовая ошибка изменится на значение $\Delta \alpha_0 = 2\pi$, соответствующее довороту вала на один оборот).

Максимальное время фазирования разработанным способом составляет:

$$t_{\phi max} = \frac{2\pi}{\Delta \omega_{\Gamma}} = \frac{2\pi}{\sqrt{4\pi \varepsilon_m}} = \sqrt{\frac{\pi}{\varepsilon_m}} = \sqrt{z} \sqrt{k} \sqrt{D_{\varepsilon}}^{-1}.$$

Что значительно меньше максимального времени фазирования оптимальным способом фазирования:

$$t_{\phi max} = 2\sqrt{z} \sqrt{k} \sqrt{D_{\varepsilon}}^{-1} \sqrt{1 - \delta^2}^{-1},$$

где $\delta = \varepsilon_n / \varepsilon_m < 1$.

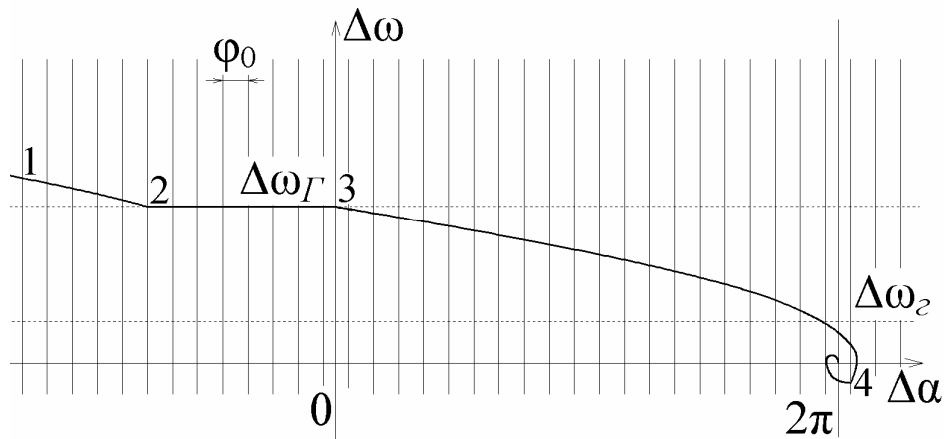


Рис. 9. Фазовый портрет работы синхронно-синфазного электропривода с предварительным фазированием с постоянной скоростью доворота вала

На рис. 10 приведена обобщенная функциональная схема фазирующего регулятора синхронно-синфазного электропривода построенного на основе способа предварительной синхронизации, где БОУР – блок определения углового рассогласования, СС – схема сравнения (на выходе 1 если $\Delta\alpha=0$), БФДЧ – блок формирования дополнительной частоты $f_{\partial} = f_{оп} - \Delta f_{Г}$, БОС – блок определения синхронизации.

Следует отметить, что значение $\Delta\omega_{Г}$ не зависит от заданной угловой скорости, а зависит только от максимального ускорения электропривода, что упрощает возможность практической реализации данного способа. Предложенный способ позволяет значительно сократить время фазирования электропривода.

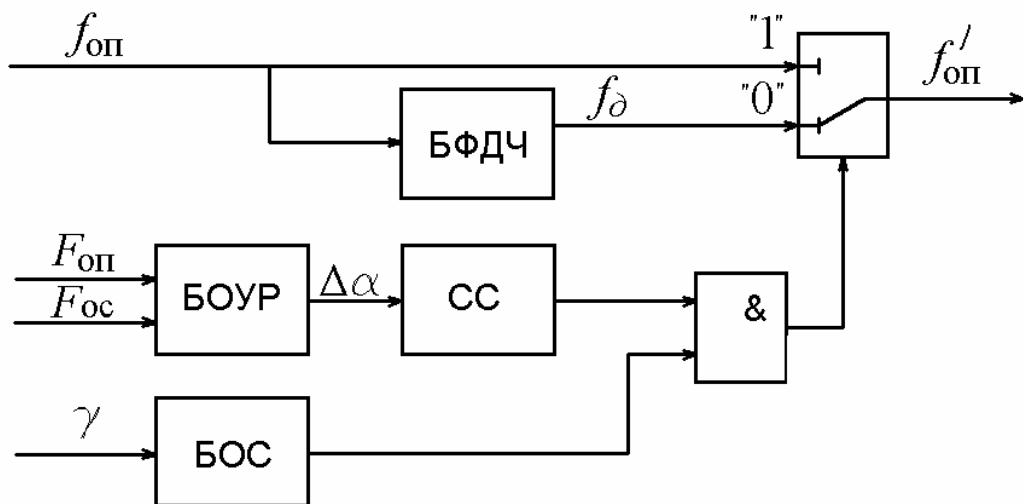


Рис. 10. Обобщенная функциональная схема фазирующего регулятора построенного на основе способа предварительной синхронизации

В четвертой главе в приложении Simulink пакета программ Matlab, на основе предложенной компьютерной модели ИЧФД, разработана имитационная модель ССЭ (рис. 11).

Адекватность имитационной модели ССЭ проверена соответствием экспериментальных данных (рис. 12а) результатам моделирования (рис. 12б) синхронно-синфазного электропривода ПС-10. В моделируемом электроприводе ПС-10 использован ИДЧ с $z = 4800$ ($\varphi_0 = 2\pi/z \approx 1.31 \cdot 10^{-3}$ рад) и бесконтактный синхронный электродвигатель (СД) с возбуждением от постоянных магнитов ДС-9 ($\varepsilon_m = 10 \text{ с}^{-1}$ и $\varepsilon_n/\varepsilon_m \leq 0.07$), на основе которого реализован БДПТ путем использования системы релейного частотно-токового управления СД.

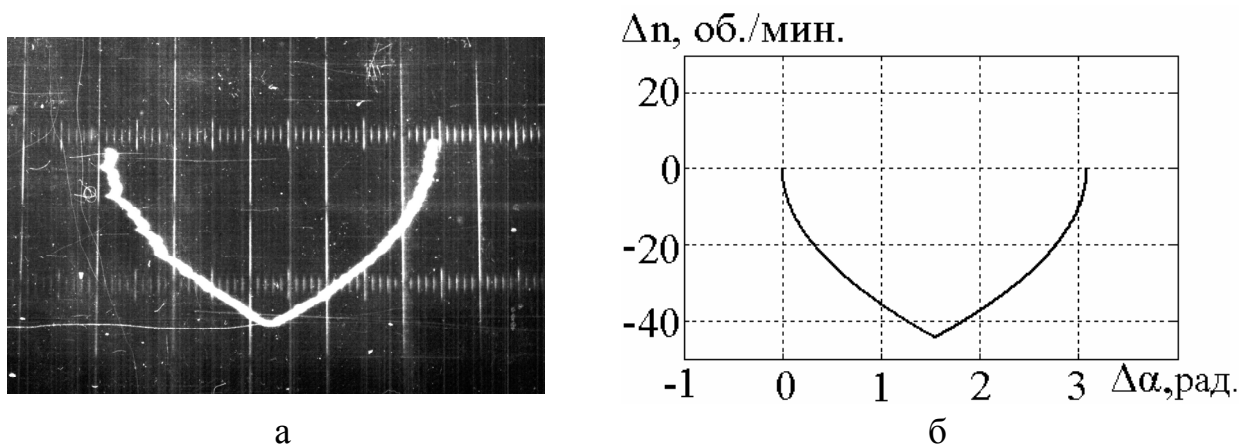


Рис. 12. Фазовый портрет работы ССЭ при фазировании квазиоптимальным способом (а – осциллограммы: $M_x = 0.75$ рад/см, $M_y = 20$ об./мин/см; б – результаты моделирования)

Для исследования разработанных в диссертационной работе способов регулирования ССЭ в имитационной модели был изменен алгоритм переключений между моделируемыми режимами работы электропривода (торможение с максимальным ускорением, разгон с максимальным ускорением, линейный режим работы). Передаточные функции системы регулирования в каждом из возможных режимов работы ССЭ изменены при этом не были, что позволяет говорить о достоверности имитационного моделирования.

Было проведено исследование имитационной компьютерной модели синхронно-синфазного электропривода с опережающей разблокировкой ИЧФД. Полученные результаты отражены в таблице 1. Результаты подтверждают достоверность основных теоретических положений диссертационной работы: в случае применения опережающей разблокировки ИЧФД переходный процесс проходит с меньшим перерегулированием по скорости и за меньшее время.

Таблица 1

Динамические показатели качества регулирования электропривода при фазовой синхронизации

Показатель качества регулирования ЭП сканирующих систем	Обычный алгоритм работы ЛУС при $n_3 = 60 - 6000$ об./мин.	Алгоритм работы ЛУС с опережающей разблокировкой ИЧФД $n_3 = 60 - 6000$ об./мин.
перерегулирование по угловой скорости – σ	2,5–0,025 %,	0,4–0,004 %
время фазовой синхронизации – $t_{фс}$ (нач. условия $\Delta\omega = \Delta\omega_2$, $\Delta\alpha = -\varphi_0/2$)	0,06с.	0,04с.

Фазовые портреты работы контура ФАПЧВ синхронно-синфазного электропривода с опережающей разблокировкой ИЧФД и с обычным алгоритмом работы приведены на рис. 13.

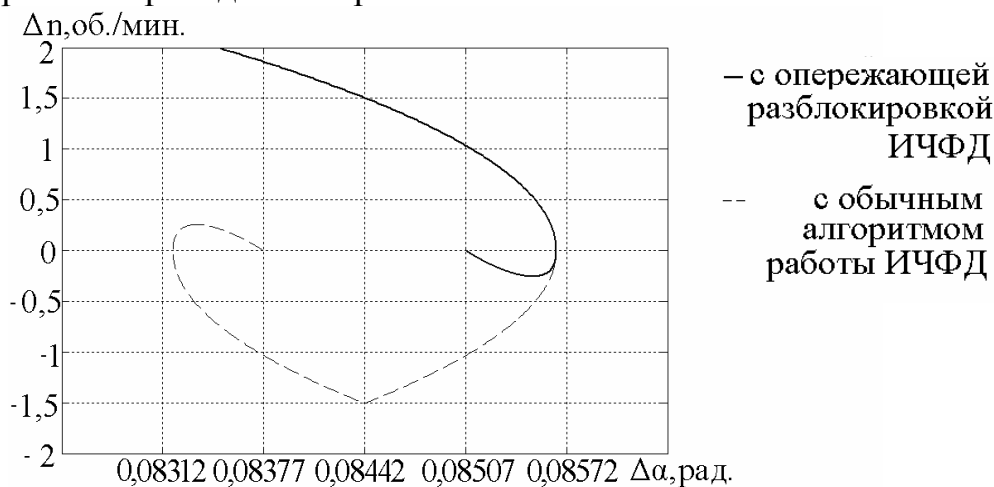


Рис. 13. Фазовые портреты работы контура фазовой автоподстройки частоты вращения

Проведено исследование имитационной компьютерной модели синхронно-синфазного электропривода при фазировании тремя способами: с постоянной скоростью доворота вала; оптимального фазирования; предварительного фазирования с постоянной скоростью доворота вала.

В таблице 2 представлены результаты сравнения показателей качества регулирования ЭП при использовании двух из трех рассмотренных способов фазирования, которые обеспечивают наибольшее быстродействие: оптимального по быстродействию и предварительного фазирования с постоянной скоростью доворота вала электродвигателя.

Таблица 2

Динамические показатели качества регулирования электропривода при фазировании

Показатель качества регулирования ЭП сканирующих систем	Способ оптимального фазирования при $n_3 = 200$ об./мин.	Способ предварительного фазирования с постоянной скоростью доворота при $n_3 = 200$ об./мин.
перерегулирование по угловой скорости – σ	27%,	0,8%
время регулирования – t_p	3,28с.	2,72с.
время синхронизации – t_c	2,16с.	2,16с.
время фазирования – $t_{\phi \max}$	1,12с.	0,56с.

Фазовые портреты и временные диаграммы перехода электропривода в синхронно-синфазный режим работы при начальных условиях, выбранных из условия максимума времени фазирования, представлены на рис. 14а и рис. 14б.

Из временных диаграмм, фазовых портретов и сравнительной таблицы 2 видно, что способ предварительного фазирования обладает наиболее высоким быстродействием и низким перерегулированием.

Полученные результаты моделирования практически подтверждают достоверность основных теоретических положений диссертационной работы.

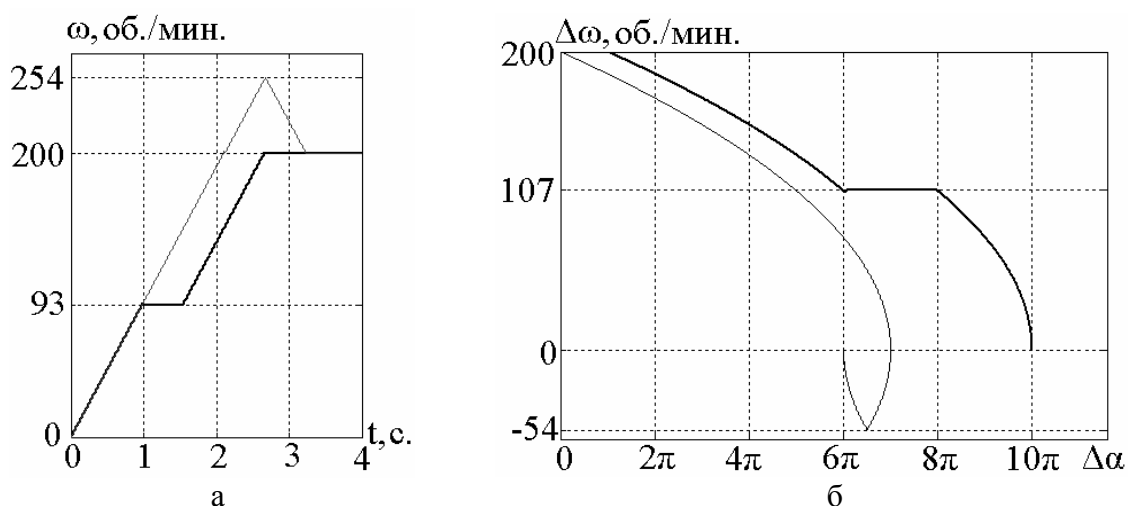


Рис. 14. Выход электропривода на синхронно-синфазный режим работы (где — – способ с оптимальным по быстродействию регулированием, - - - способ предварительного фазирования; а – фазовые портреты; б – временные диаграммы)

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы и выводы.

В приложения вынесены: реализация алгоритма импульсного частотно-фазового дискриминатора в пакете программ Matlab (Simulink), акты внедрения и использования результатов диссертационной работы.

Основные результаты и выводы

1) Проведен сравнительный анализ способов регулирования ССЭ и работы его основных узлов и определены перспективные направления их модернизации и усовершенствования для улучшения качества регулирования.

2) Разработан алгоритм работы импульсного частотно-фазового дискриминатора с расширенными функциональными возможностями (индикация режимов работы, определение момента времени прохождения двух импульсов одной из сравниваемых частот между двумя соседними импульсами другой частоты, возможность принудительного перевода импульсного частотно-фазового дискриминатора в режим фазового сравнения) и с повышенной за счет синхронизации работы триггеров надёжностью работы, что позволяет использовать его при разработке сложных более эффективных способов управления.

3) Разработаны способы косвенного определения ошибки по угловой скорости в режимах насыщения логического устройства сравнения, путем логического анализа взаимного порядка следования импульсов опорной частоты и частоты обратной связи, что позволяет реализовать более сложные и эффективные способы управления.

4) На основе способов косвенного определения ошибки по угловой скорости разработаны алгоритмы работы частотного дискриминатора, входящего в состав логического устройства сравнения с опережающей разблокировкой ИЧФД, позволяющие уменьшить величину перерегулирования

и время переходного процесса при переходе к фазовой синхронизации из режима сравнения частот.

5) Разработан способ и функциональная схема предварительного фазирования с постоянной скоростью доворота вала электродвигателя, обеспечивающие значительное снижение перерегулирования по частоте вращения и повышение быстродействия синхронно-синфазного электропривода за счет значительного уменьшения максимального времени фазирования, что уменьшает потери информации о сканируемом объекте.

6) Разработана компьютерная модель ИЧФД, позволяющая проводить исследования методом имитационного моделирования ССЭ в приложении Simulink программного пакета Matlab.

7) Исследованы разработанные в программном пакете MATLAB компьютерные модели синхронно-синфазного электропривода, полученные результаты моделирования подтверждают достоверность разработанных способов регулирования.

Список опубликованных работ, отражающих основные научные результаты диссертации:

1. Бубнов А. В., Чудинов А. Н., Емашов В. А. Эффективный способ регулирования электропривода с фазовой синхронизацией // Известия вузов. Электромеханика. 2011. № 5. С. 46–49.

2. Бубнов А. В., Чудинов А. Н., Емашов В. А. Алгоритм работы компьютерной модели импульсного частотно-фазового дискриминатора и его реализация в приложении Simulink пакета программ MATLAB // Омский научный вестник. Серия «Приборы, машины и технологии». 2010. № 3(93). С. 123–127.

3. Бубнов А. В., Емашов В. А., Чудинов А. Н. Способ косвенного определения ошибки по частоте вращения в электроприводе с фазовой синхронизацией в режиме насыщения логического устройства сравнения // Омский научный вестник. Серия «Приборы, машины и технологии». 2011. № 1(97). С. 99–103.

4. Бубнов А. В., Чудинов А. Н., Емашов В. А. Способ улучшения динамики электропривода с фазовой синхронизацией на основе косвенного определения ошибки по частоте вращения в режимах насыщения логического устройства сравнения // Омский научный вестник. Серия «Приборы, машины и технологии». 2011. № 1(97). С. 103–106.

5. Бубнов А. В., Чудинов А. Н., Емашов В. А. Алгоритм работы компьютерной модели импульсного частотно-фазового дискриминатора. М.: ВНИИЦ, 2010. № 50201000460.

6. Бубнов А. В., Чудинов А. Н., Емашов В. А. Алгоритм работы компьютерной модели дополнительного частотного дискриминатора систем фазовой автоподстройки частоты. М.: ВНИИЦ, 2011. № 50201151534.

7. Бубнов А. В., Чудинов А. Н., Харченко Е. Ф. Алгоритм работы компьютерной модели дополнительного частотного дискриминатора электропривода с фазовой синхронизацией. М.: ВНИИЦ, 2011. № 50201151533.

8. Бубнов А. В., Чудинов А. Н. Исследование компьютерной модели электропривода с фазовой синхронизацией // Динамика систем, механизмов и машин: Матер. VII Междунар. науч.-техн. конф. Омск, 2009. Кн. 1. С. 138-143.

9. Бубнов А. В., Емашов В. А., Виноградова Я. В., Чудинов А. Н. Особенности формирования корректирующих сигналов в электроприводе с фазовой синхронизацией в режимах насыщения логического устройства сравнения // Россия молодая : передовые технологии – в промышленность : матер. III Всерос. молодежн. науч.-техн. конф. Омск, 2010. Кн. 2. С. 22-25.

10. Бубнов А. В., Емашов В. А., Харченко Е.Ф., Чудинов А. Н. Исследование влияния структуры и параметров фильтра нижних частот на выходе логического устройства сравнения на динамику электропривода с фазовой синхронизацией // Россия молодая : передовые технологии – в промышленность : матер. III Всерос. молодежн. науч.-техн. конф. Омск, 2010. Кн. 2. С. 25-29.

11. Бубнов А. В., Бубнова Т. А., Чудинов А. Н. Исследование влияния уровня токоограничения на динамику электропривода с фазовой синхронизацией // Энергетика и энергосбережение: межвуз. тематический сб. науч. тр. Омск: ОмГТУ, 2011. С. 81–87.

12. Бубнов А. В., Чудинов А. Н., Емашов В. А. Способ фазирования синхронно-синфазного электропривода с оптимальным по быстродействию регулированием // Россия молодая : передовые технологии – в промышленность : матер. IV Всерос. молодежн. науч.-техн. конф. Омск, 2011. Кн. 2. С. 27-29.

13. Бубнов А. В., Чудинов А. Н., Харченко Е. Ф., Федоренко И. Г. Эффективный способ регулирования электропривода с фазовой синхронизацией // Россия молодая : передовые технологии – в промышленность : матер. IV Всерос. молодежн. науч.-техн. конф. Омск, 2011. Кн. 2. С. 30-33.

14. Бубнов А. В., Чудинов А. Н., Гокова М. В. Стабилизированный электропривод: пат. 113095 Рос. Федерация. № 2011131216/07; Заявлено 26.07.2011; Опубл. 27.01.2012, Бюл. № 3. 2 с.

Отпечатано в типографии Новосибирского
Государственного технического университета
630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
тел./факс (383) 346-08-57
формат 60 X 84/16 объем 1.25 п.л. тираж 100 экз.
Заказ №631 подписано в печать 5.04.2012 г.