

На правах рукописи

ПОКЛАД Павел Михайлович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОГРАММНО-
АППАРАТНЫХ СРЕДСТВ УПРАВЛЕНИЯ
ИМПУЛЬСНО-ФАЗОВЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ**

(на примере цифровых систем наведения оптических телескопов)

Специальность: 05.09.03 - Электротехнические комплексы и системы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново - 2011

Работа выполнена в ГОУ ВПО "Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина" (ИГЭУ).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Фалеев Михаил Владимирович
кандидат технических наук, доцент
Киселев Александр Анатольевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Староверов Борис Александрович

кандидат технических наук
Карандашев Андрей Платонович

Ведущая организация ГОУ ВПО "Владимирский
государственный университет",
г. Владимир

Защита диссертации состоится "24" июня 2011 г. в 11 часов на заседании совета Д 212.064.02 при ИГЭУ по адресу 153003, Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корп. Б., аудитория 237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИГЭУ, автореферат размещен на сайте www.ispu.ru.

Автореферат разослан "20" мая 2011 года

Ученый секретарь
специализированного совета _____ В. В. ТЮТИКОВ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В настоящее время организация контроля космического пространства (КП) объективно становится одной из актуальных задач государства в укреплении авторитета нашей страны в современном многополярном мире, а также повышении безопасности космических полетов в условиях техногенного загрязнения околоземного КП. Задача контроля КП решается комплексом специализированных оптико-электронных и лазерно-оптических средств. В то же время в связи с постоянным совершенствованием космических аппаратов и повышении их характеристик существующие наземные средства контроля КП созданные еще в прошлом веке, не обеспечивают в полной мере решения возложенных на них задач.

Важной задачей при модернизации действующих оптико-электронных цифровых систем наведения (ЦСН) оптических телескопов является повышение качества наблюдений за КП путем замены малонадежных аналоговых систем электропривода их осей на цифровые с развитым "интеллектуальным" управлением без изменения существующих высокоточных многоступенчатых кинематических схем. Однако, военная "закрытость" таких установок не позволяет использовать зарубежные электроприводы, поэтому задача разработки отечественных высокоточных систем электропривода телескопов на основе современной элементной базы представляется весьма актуальной и важной.

Состояние проблемы. Основным направлением решения данной задачи является разработка эффективных прецизионных электроприводов осей телескопов высокоточных оптических комплексов. Среди существующих проблем рассматриваемых систем можно выделить следующие: применяемые каналы грубого и точного наведения с высокой и низкой жесткостью соответственно, ненадежные и громоздкие системы управления электропривода, низкоточные датчики положения вала двигателя. В настоящее время, к новым системам управления электропривода предъявляются следующие требования: широкий диапазон регулирования скорости равный 36000:1, инфранизкие скорости движения телескопа от 1 "/сек (0,07 об/сутки) до 10 °/сек (2333 об/сутки), "переброс" оси на заданные углы за минимальное время, высокая надежность, встраиваемость в локальные сети управления, наличие встроенных средств диагностики, возможность программной настройки системы локально и удаленно.

Сегодня комплексный подход к обеспечению указанных требований невозможен без активного использования информационных технологий на всех этапах проектирования, исследования и эксплуатации современных систем прецизионных электроприводов оптико-электронных комплексов высокоточных наблюдений.

Широкое использование точных электроприводов, построенных на основе контура фазовой синхронизации обусловлено их высокими точностными показателями в широком диапазоне регулирования угловой скорости. Основы теории построения прецизионных систем электропривода постоянного тока

заложены в работах Р.М. Трахтенберга. Экспериментальные и теоретические исследования в этой области проводились различными научными коллективами. Значительный вклад в решение вопросов проектирования таких систем внесли Б.А. Староверов, М.В. Фалеев, В.В. Андрущук, В.П. Галас, А.В. Ханаяев, А.Н. Ширяев, А.А. Киселев, И.В. Булин-Соколов, В.Г. Кавко, В.Н. Катькалов, С.М. Миронов, В.И. Стребков, А.М. Сутормин, Б.М. Ямановский и др.

На этой основе спроектированы электроприводы для различных областей применения, разработаны новые способы регулирования и новые технические решения построения систем управления. Достижения этого коллектива, а также разработки ряда научных и проектных организаций Санкт-Петербурга, Новосибирска, Омска, Азова создали мощный фундамент для дальнейшего развития этого принципа, но на современной схемотехнической и программной базе.

Целью работы является разработка высокоточного электропривода постоянного тока с широким диапазоном регулирования скорости, предназначенного для управления движением орбитальной оси телескопа и программного обеспечения верхнего уровня для контроллера электропривода.

Достижение поставленной цели требует решения следующих **задач**:

1. Анализ проблемы управления сложным движением телескопа и определение требований, предъявляемых к современной системе электропривода орбитальной оси телескопа;

2. Исследование возможностей построения системы управления электропривода орбитальной оси телескопа на базе контура цифровой фазовой синхронизации и определение рациональных способов организации аппаратно-программных средств контроллера электропривода ЦСН (КЭП ЦСН);

3. Исследование возможностей повышения качества управления координатами движения орбитальной оси на основе использования традиционных регуляторов фазовых переменных и регуляторов на базе нечеткой логики;

4. Разработка эффективного способа ограничения скорости движения орбитальной оси в зависимости от пройденного пути при ее позиционировании для снижения ударных нагрузок в приводном механизме;

5. Разработка системного программного обеспечения для программирования контроллера, наладки и тестирования электропривода и способа организации двустороннего информационного взаимодействия программ с контроллером электропривода. Разработка структуры хранилища данных и информационной системы подготовки и просмотра интерактивных электронных технических руководств (ИЭТР) для электропривода ЦСН;

6. Практическое подтверждение эффективности использования разработанного контроллера электропривода орбитальной оси в механизмах ЦСН.

Достоверность и обоснованность полученных в работе результатов подтверждается результатами экспериментальных испытаний и актами использования КЭП ЦСН на ОАО Красногорский завод им. С. А. Зверева (КМЗ), а также официальными свидетельствами на разработанные программные продукты.

Методы исследования. При решении поставленных задач в работе использовались методы машинного и объектно-ориентированного программирования, методы нечеткой логики, элементы теории автоматического управления, элементы теории баз-данных. Теоретические исследования проведены на ЭВМ, а практические – на действующем технологическом образце ЦСН.

Научная новизна полученных в работе результатов состоит в:

– обосновании структуры и принципа построения прецизионного электропривода оси телескопа на базе контура цифровой фазовой синхронизации, позволяющего обеспечить высокую точность движения;

– методе повышения точности управления на основе многоразрядного частотно-фазового дискриминатора, обеспечивающего защиту от опрокидывания регулирования и уменьшение величины перерегулирования по скорости при выходе дискриминатора из состояния насыщения;

– способе формирования тахограммы разгона/торможения двигателя в функции пройденного пути за счет совместной работы задатчиков интенсивности 1-го и 2-го порядка для снижения ударных нагрузок в приводном механизме;

– способе повышения качества управления на основе совместного применения традиционных и нечетких регуляторов;

– разработке методики организации структуры системного программного обеспечения верхнего уровня, обеспечивающего программирование (свидетельство РФ № 2011610718) контроллера без дополнительных программно-аппаратных средств, наладку (свидетельство РФ № 2010615959) и тестирование (свидетельство РФ № 2010615958) электропривода с возможностью дистанционной работы, выполняемой средствами удаленного доступа;

– способе электронной организации технической документации посредством раздельного хранилища текстовых/графических данных и информационной системы подготовки (свидетельство РФ № 2011612095) и просмотра (свидетельство РФ № 2011613050) иерархически структурированных электронных руководств с возможностью локальной корректировки и удаленного обновления данных через Интернет.

Основные положения, представляемые к защите

– положение о необходимости использования принципа цифровой фазовой синхронизации для построения прецизионного электропривода цифровой системы наведения оптического телескопа;

– положение о необходимости "интеллектуализации" системы управления электроприводом за счет использования традиционных регуляторов фазовых переменных и устройств на базе нечеткой логики для повышения качества управления и уменьшения чувствительности системы к параметрам объекта управления;

– способ организации информационного взаимодействия контроллера электропривода и разработанного системного программного обеспечения для его программирования (свидетельство РФ № 2011610718), а также наладки (свидетельство РФ № 2010615959) и тестирования (свидетельство РФ № 2010615958) электропривода;

– способ организации отдельного хранилища данных для разработанной информационной системы подготовки (свидетельство РФ № 2011612095) и просмотра (свидетельство РФ № 2011613050) интерактивных электронных технических руководств с возможностью удаленного обновления данных.

Практическая значимость работы заключается в:

– разработке аппаратных и программных средств контроллера электропривода постоянного тока с цифровой фазовой синхронизацией, предназначенного для управления движением орбитальной оси телескопа;

– реализации системного программного обеспечения верхнего уровня для программирования контроллера, наладки и тестирования электропривода с минимальными программно-аппаратными затратами;

– организации структуры хранилища данных для размещения текстовой и графической информации ИЭТР и разработке программных средств для подготовки и просмотра ИЭТР, позволяющих поддерживать актуальность информации и обеспечивающих наглядность при работе с сопроводительной документацией за счет иерархически структурированной формы представления данных и возможности их корректировки и удаленного обновления;

– разработке и наполнении информационного интернет-портала по цифровым импульсно-фазовым электроприводам www.electrodrives.ru;

– полученных положительных практических результатах замены громоздкой и малонадежной аналоговой системы электропривода орбитальной оси телескопа на компактную цифровую импульсно-фазовую, построенную на современной элементной базе, которая может применяться на остальных осях телескопа;

– возможности использования только одного канала "грубого наведения" кинематической передачи, более высокая жесткость которого позволяет снизить влияние внешних возмущений на качество воспроизведения заданных параметров движения орбитальной оси телескопа ЦСН.

Связь с целевыми программами. Работа выполнялась в соответствии:

– с федеральной целевой программой "Национальная технологическая база" на 2007-2011 гг. в рамках хозяйственной работой №61/09 по теме "Разработка и изготовление контроллера электропривода" (2009-2010 гг.);

– с федеральной целевой программой "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" (2009-2013 гг.), по лоту "Проведение научных исследований коллективами научно-образовательных центров в области станкостроения" (2010-1.1-409-007) в рамках темы "Комплексная разработка цифровой системы ЧПУ и асинхронного электропривода для металлорежущих станков с применением перспективных технологий обработки" (Государственный контракт № 02.740.11.0521, Этап 2).

Использование в учебном процессе. Разработанные программы используются студентами ИГЭУ в лабораторных практикумах кафедры "Технология автоматизированного машиностроения" при подготовке инженеров по направлению 151001.65 - Технология машиностроения в рамках учебных курсов: "Аппаратные и программные средства систем автоматизации", "Управление системами и процессами обработки в машиностроении".

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались и обсуждались на XIII, XVII международных научно-технических конференциях студентов и аспирантов "Радиотехника, электротехника и энергетика" (Москва, 2007, 2010 гг.), международной научно-технической конференции "Состояние и перспективы развития электротехнологии" XIV Бенардосовские чтения (Иваново, 2007 г.), VIII международной научно-технической конференции "Новые информационные технологии и системы" (Пенза, 2008 г.), XIV международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Современные техника и технологии" (Томск, 2008 г.), международной научно-технической конференции "Компьютерное моделирование 2008" (Санкт-Петербург, 2008 г.), всероссийской международной научно-технической конференции "Электро-2009" (Уфа, 2009 г.), международной научно-технической конференции "Автоматизация: проблемы, идеи, решения" (АПИР-15) (Тула, 2010 г.), V всероссийской научно-практической конференции "Повышение эффективности энергетического оборудования" (Иваново, 2010 г.), международной научно-практической конференции "XXXIX Неделя науки СПбГПУ" (Санкт-Петербург, 2010 г.), VIII международной научно-технической конференции "Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий" (АПЭЭТ-11) (Екатеринбург, 2011 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 21 работа, в том числе 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК министерства образования и науки РФ, 5 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников, включающего 143 наименования, и четырех приложений. Работа изложена на 170 страницах, содержит 141 рисунок и 10 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель и задачи работы, научная новизна и практическая ценность.

В первой главе определены требования к электроприводу орбитальной оси телескопа, предназначенного для эксплуатации в суровых климатических условиях в цифровой системе наведения и выявлены основные проблемы штатной аналоговой системы управления.

Анализ тенденций развития прецизионных электроприводов показал, что эффективным способом обеспечения указанных требований является использование контура цифровой фазовой синхронизации с программно реализованными на специализированном микроконтроллере (МК) dsPIC30F4011 серии "Motor Control" регуляторами и блоками управления. Функциональная схема электропривода с цифровой фазовой синхронизацией представлена на рис. 1.



Рис. 1. Функциональная схема ЭП ЦСН

(СИ). В КЭП ЦСН измерение параметров движения (скорости ω_D и угла поворота вала ϕ) двигателя М производится энкодером ВР, квадратурные выходные сигналы которого с частотой f_{BP} поступают на встроенный интерфейс оптического датчика (QE1). Многоразрядный частотно-фазовый дискриминатор (МЧФД), характеристики которого приведены на рис. 2, обеспечивает защиту от опрокидывания регулирования и передачу цифрового кода, соответствующего величине фазовой ошибки в цифровой блок управления. Малая величина смещения частных характеристик МЧФД, определяемая разрешением δ датчика положения значительно уменьшает величины перерегулирования по скорости при выходе дискриминатора из состояния насыщения.

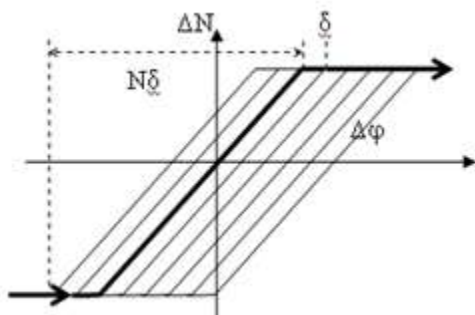


Рис. 2. Выходные характеристики МЧФД

Указанный вариант построения КЭП ЦСН предполагает выполнение практически всех функций управления встроенным в контур регулирования МК (рис. 3), что позволяет расширить возможный набор алгоритмов управления системой при сохранении основного ее преимущества по сравнению с другими системами – управлению по величине фазовой ошибки частотных сигналов задания и обратной связи, и обеспечить встраиваемость в локальную сеть управления. Работа системы управления базируется на информации о положении вала, получаемой с интерфейса измерительного преобразователя ИИП – инкрементального энкодера. Задание уровня скорости и вычисление величины фазового рассогласования осуществляется на программном уровне.

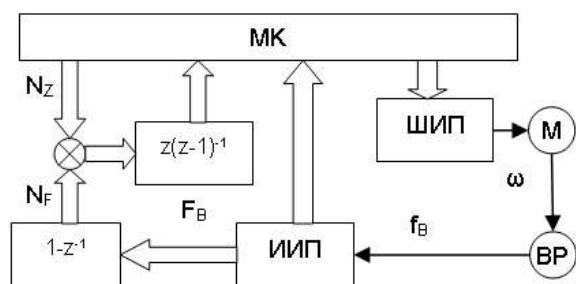


Рис. 3. Принцип построения ЭП ЦСН с микроконтроллерным управлением

Установлено, что обеспечение требуемых точностных и регулировочных

характеристик ЦСН возможно без изменения ее кинематической схемы при использовании штатных двигателей постоянного тока независимого возбуждения (ДПТНВ) типа 2ПБН112МГ с номинальной мощностью 0,55 кВт, путем замены аналоговых систем управления на импульсно-фазовые, построенные на базе современной микропроцессорной технике управления.

Во второй главе проведен анализ интеллектуальных технологий управления, который позволил установить, что серьезной альтернативой классическим методам цифрового управления являются способы автоматического управления на основе нечеткой логики, позволяющие понизить сложность алгоритмов управления, сократить время проектирования и внедрения в производство.

При построении нечетких регуляторов используются две входные переменные: ошибка по регулируемой величине фазового рассогласования e_1 и её производная de , определяемая как $de = k_p \frac{z-1}{z} e_1$, где z – оператор дискретного преобразования. Структурная схема нечеткого регулятора (НР) состояния объекта управления (ОУ) (рис. 4) содержит блоки фаззификации, дефаззификации и логического заключения, выполняемого на основе заложенной в алгоритм регулятора базы знаний.

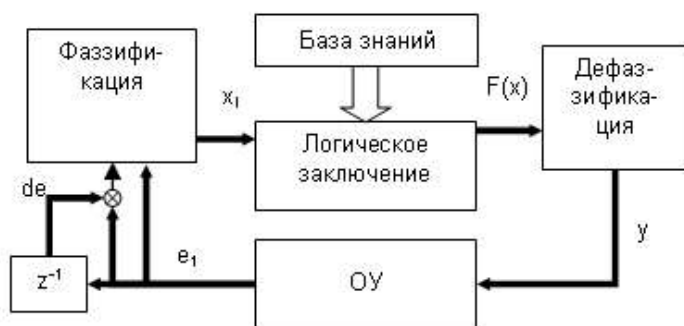


Рис. 4. Блочная структура системы нечеткого управления

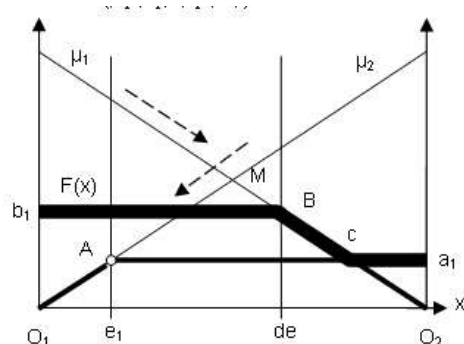


Рис. 5. Формирование нечеткого множества

Блок фаззификации определяет степень принадлежности входных переменных e_1 и de к нечетким множествам (НМ). Предлагается применение относительно простых по представлению функций принадлежности $\mu_1(x)$ и $\mu_2(x)$, форма которых представлена на рис. 5

Функции принадлежности $\mu(x)$ формируют два НМ $S_a = \{ O_1, A, a_1, O_2 \}$ и $S_b = \{ O_1, b_1, B, O_2 \}$ ограниченных вершинами, границы которых определяются в соответствии с условиями Балдвина как

$$\begin{aligned} \mu_1(x) &= 1 - x ; \\ \mu_2(x) &= x . \end{aligned} \tag{1}$$

Результирующее множество R , определяемое как $R = S_a \text{ and } S_b$, ограничивается вершинами $R = \{ O_1, b_1, B, c, O_2 \}$.

Для входных сигналов НР e_1 и de в блоке логических заключений, базирующемся на принципах минимаксного регулятора Мамдани, в соответствии с (2) выбираются значения координат вершин А и В множества.

$$\begin{aligned} A &= \min\{\mu_2(e_1), \mu_2(de)\}; \\ B &= \min\{\mu_1(e_1), \mu_1(de)\}. \end{aligned} \quad (2)$$

Блок дефазификации (ДФ) преобразует нечеткое результирующее множество R в скалярную величину y в соответствии с выбранным способом ДФ, во многом определяющим эффективность использования НР.

В качестве базового способа ДФ выбран наиболее часто рекомендуемый метод, основанный на понятии центра тяжести НМ (сog-метод). При этом величина полученного скалярного сигнала выходного сигнала y определяется по выражению:

$$y = \frac{\int_{0,5}^1 (R(x)(x - 0,5))dx - \int_0^{0,5} (R(x)(0,5 - x))dx}{\int_0^1 R(x)dx} \quad (3)$$

Очевидно, что непосредственное использование выражения (3) в контуре управления ЭП связано со значительными вычислительными трудностями.

Анализ возможностей применения в ЭП методов ДФ показал, что реализация соа- и сог-методов связана с выполнением большого объема вычислений. Применение же синглетон метода при выбранных функциях принадлежности приводит к существенному отклонению характеристик вход/выход НР от желаемых.

Предложен простой алгоритм ДФ, условно названный методом "эквивалентной площади" (МЭП), суть которого заключается в определении разности площадей получаемого по условиям (2) НМ, расположенных по разные стороны относительно линии, проходящей через точку М, определяющей пересечение ФП $\mu_1(x)$ и $\mu_2(x)$. В этом случае выходной сигнал y НР определяется по следующему выражению

$$y = \int_0^{0,5} F(x)dx - \int_{0,5}^1 F(x)dx, \quad (4)$$

где $F(x)$ – граница нечеткого множества.

На рис. 6 показаны выходные характеристики НР, определенные относительно сигнала ошибки e_1 при разных величинах de полученные при реализации ДФ с использованием предлагаемого алгоритма МЭП (зависимости 1 и 2) и достаточно традиционного сог-метода – зависимости 3, 4.

Из представленных характеристик следует, что предложенный МЭП-алгоритм ДФ при $de=0$ обеспечивает выходную характеристику,

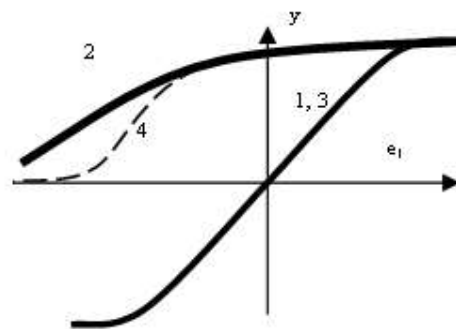


Рис. 6. Выходные характеристики НР: 1, 3 – МЭП и сог- ДФ при $de=0$ соответственно; 2, 4 – МЭП и сог- ДФ при $de=0,99$ соответственно

аналогичную полученной при использовании более сложных методов выполнения этой операции. При предельных величинах сигнала d_e наблюдается расхождение выходных характеристик определенных для разных способов ДФ. Это свидетельствует о том, что предлагаемый МЭП-метод характеризуется по сравнению с cog- и соа-методами меньшей степенью подавления выходного сигнала в режимах выхода из граничных состояний.

В отличие от широко используемых cog- и соа- методов ДФ предлагаемый метод не требует применения сложных выражений, использования громоздкой базы данных, а по объёму вычислений он сравним с НР использующим синглетон ДФ, но не требует при этом использования ФП сложной конфигурации, что позволяет реализовывать нечеткую логику управления в МК семейства "Motor Control", в которых для ускорения вычислений используется DSP-ядро.

Разработан программный алгоритм ограничения темпа изменения частоты задающего сигнала, реализующий функции совместной работы задатчиков интенсивности первого (ЗИ-1) и второго (ЗИ-2) порядков с заданным условием их переключений, позволяющий формировать трапециидальную тахограмму разгона/торможения двигателя (рис. 7, б). Функциональная схема разработанного программного узла представлена на рис. 7, а.



Рис. 7. Программный узел: а) функциональная схема узла; б) вид формируемой кривой

Представленный алгоритм позволяет ограничивать темп изменения скорости в функции пройденного пути: $S_1(V, PL)$ и $S_2(V, T, PL)$ для ЗИ-1 и ЗИ-2 соответственно.

Графики изменения скорости (5) при окончании разгона представлены на рис. 8-9, определяемой по выражению

$$V_{22}(t) = V + T \cdot PL \cdot \left(1 - e^{-\frac{V}{PL \cdot T}} \right) e^{-\frac{t}{T}}, \quad (5)$$

где V – скорость (дискрет/пер);

PL – темп торможения;

T – постоянная времени ЗИ второго порядка.

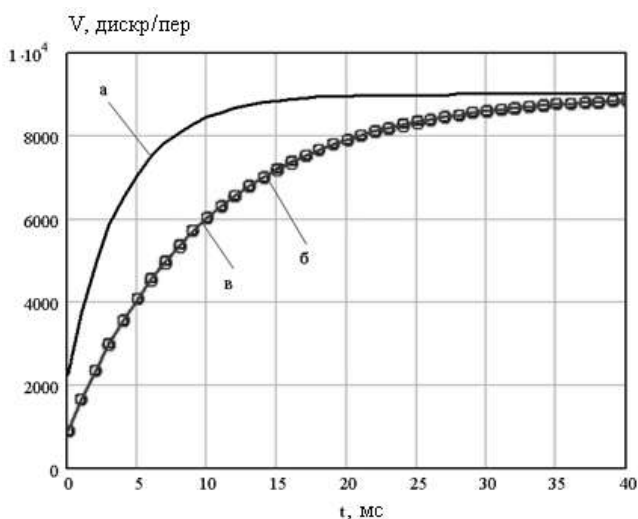


Рис. 8. График изменения скорости для функции $V_{22}(V,T,PL,t)$ при $V=9000$: а) $T=4, PL=10$; б) $T=10, PL=10$; в) $T=10, PL=30$

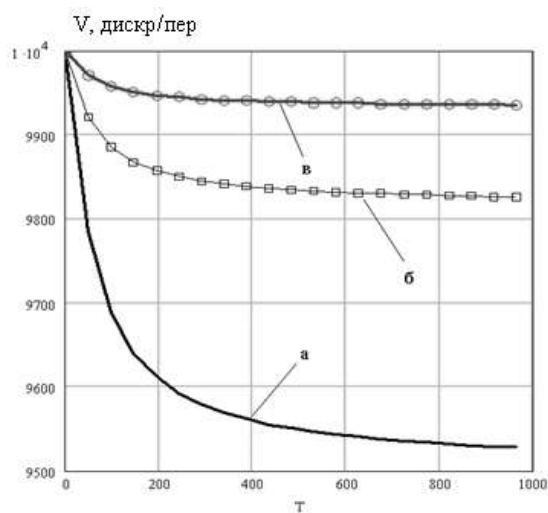


Рис. 9. Значение скорости в конце разгона ($V=10000$) при времени окончания процесса равной: а) $3T$; б) $4T$; в) $5T$

В третьей главе рассматриваются вопросы разработки системного программного обеспечения (СПО) верхнего уровня для КЭП ЦСН, программных средств подготовки и просмотра ИЭТР и интернет-портала по высокоточным импульсно-фазовым электроприводам (ИФЭП).

Для обеспечения двухстороннего программного обмена данными контроллера электропривода с управляющей ЭВМ по интерфейсам RS-232 и CAN с учетом логической структуры памяти МК разработана система адресных команд, с помощью которой обеспечивается задание параметров и структуры регуляторов, конфигурирование аппаратных средств, диагностика, командное управление движением и задание режимов работы электропривода.

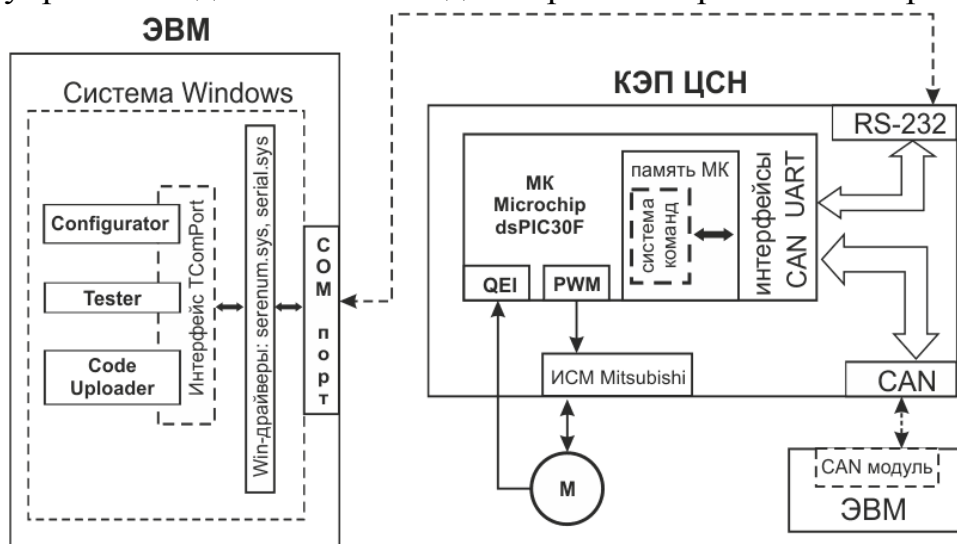


Рис. 10. Схема взаимодействия СПО с КЭП ЦСН

Разработано СПО в составе 3-х программ для решения следующих практических задач: наладка (программа Configurator – свидетельство РФ № 2010615959) и тестирование (программа Tester – свидетельство РФ № 2010615958) электропривода, программирование (программа Code Uploader – свидетельство РФ № 2011610718) контроллера.

СПО реализованное на языке Object Pascal в визуальной среде разработки Delphi 7.0 осуществляет взаимодействие с КЭП ЦСН по последовательному каналу связи в стандарте RS-232C. Взаимодействие СПО с СОМ-портом ЭВМ осуществляется с помощью программного интерфейса TComPort, который взаимодействует со встроенными в систему Windows драйверами СОМ-порта (рис. 10).

Программа Configurator, построенная в виде исполняемого модуля с графическим интерфейсом и современной справочной системой, предназначена для наладки ЭП в режимах Online и Offline путем реализации функций ввода данных, организации приема, передачи и отображения данных. Программа Tester позволяет выполнять оценку точностных показателей электропривода, анализ спектров ошибки и частотных свойств системы. Высокая достоверность информации о параметрах движения механизма, получаемая с датчика положения, позволяет тестировать электропривод без привлечения дополнительных метрологических средств. Программа Code Uploader позволяет проводить замену и проверку "прошивки" МК, интегрированного в контроллер электропривода, с помощью обычного компьютера без дополнительных дорогостоящих фирменных средств отладки и программного обеспечения за счет специального загрузчика, автономного по отношению к программным средствам контроллера электропривода (рис. 11).

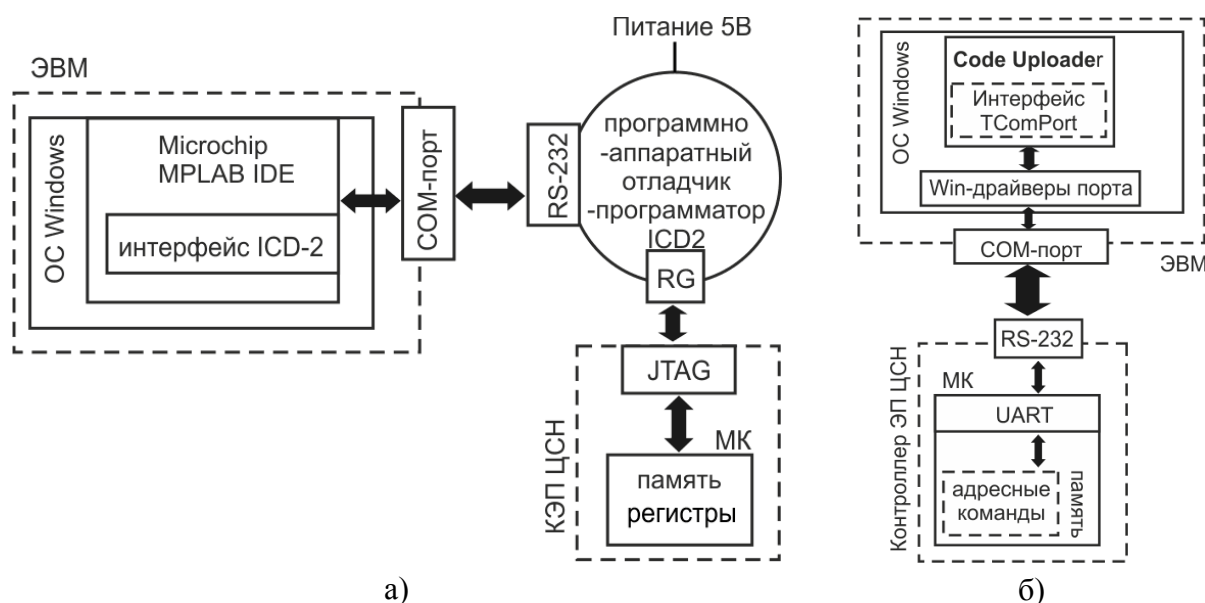


Рис. 11. Программирование КЭП: а) средствами Microchip; б) программой Code Uploader

Представленные программы позволяют изменять структуру и параметры контроллера электропривода непосредственно через локальную сеть, что обеспечивает компьютерную поддержку жизненного цикла изделия, осуществляемую в рамках CALS-технологий.

Дальнейшим развитием средств компьютерной поддержки электропривода является создание интеллектуальных систем сбора, накопления, хранения и анализа данных для повышения надежности и автономности работы ЭП. В качестве конкретных предложений можно выделить следующие: при-

ближенная автоматическая настройка электропривода под параметры объекта управления, создание клиент-серверного приложения для реализации средств удаленного доступа через сеть Интернет, создание системы сбора данных в режиме online и организация структуры хранилища для их накопления, разработка средств диагностики и экспертной системы для выдачи практических рекомендаций и советов на этапе эксплуатации электропривода.

В настоящее время, при непосредственном участии автора разработан информационный Интернет-портал по высокоточным ИФЭП, в котором отображается весь жизненный цикл рассматриваемых систем.

Эксплуатационная техническая документация является важнейшим средством эффективного использования разработанного электропривода на постпроизводственной стадии его жизненного цикла. От полноты и достоверности сведений в документации зависит качество выполнения процедур обслуживания, длительность безотказной работы привода и требуемое качество управления. Современная тенденция перехода на "безбумажную технологию" при создании документации выражается в применении ИЭТР, которые за счет своей интерактивности и возможности обновления информации позволяют повысить эффективность эксплуатации изделия.

Анализ иерархически-структурированных ИЭТР позволил установить их общую структуру, в состав которой входят база данных, где хранится вся информация об изделии, и электронная система отображения для визуализации данных и обеспечения интерактивного взаимодействия с пользователем.

Разработанная информационная система (ИС) PPL Drive Suite позволяет создавать и просматривать иерархически-структурированные ИЭТР. Она состоит из хранилища данных и двух программных модулей для редактирования (Editor) и просмотра (Browser) руководств. Хранение данных организовано в базе данных MS Access и файл-контейнере. Для защиты данных в руководствах использованы отечественные программно-аппаратные средства на базе микроконтроллера.

Для стандартизации и упрощения процедуры установки созданного программного обеспечения (ПО) в систему Windows разработан универсальный скрипт инсталлятор, реализованный в системе NSIS.

На все созданные программы получены официальные свидетельства о регистрации. Акты внедрения и использования программ подтверждают их практическую ценность.

Четвертая глава посвящена экспериментальной проверке контролера электропривода (рис. 12) орбитальной оси телескопа на действующем макетном образце ЦСН (рис. 13) в лабораторном корпусе КМЗ. Для проверки была использована методика испытаний штатной системы наведения, особенностью которой является косвенная оценка характеристик привода с помощью измерительных средств путем фиксации технологических параметров движения орбитальной оси R. Регистрация параметров выполнялась на базе канала ГН оси R с помощью штатного датчика углового положения, ЭВМ и платы АЦП.

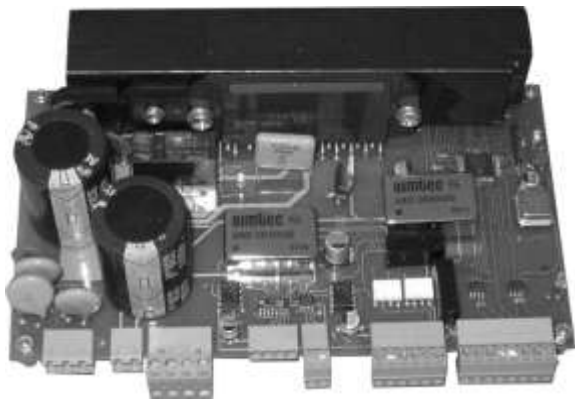


Рис. 12. Контроллер электропривода ЦСН



Рис. 13. Макетный образец ЦСН

В ходе испытаний проверялись время "переброса" оси R на углы 60° , 2° за ограниченное время, отработка скоростей в диапазонах от $1''/\text{сек}$ до $40''/\text{сек}$ в течение определенного времени, а также от $300''/\text{сек}$ до $1800''/\text{сек}$ в заданном диапазоне углов (табл. 1).

На основе полученных результатов испытаний установлено, что разработанный КЭП ЦСН обеспечивает отработку скорости от $0,3''/\text{сек}$ до $10''/\text{сек}$, переброс оси R на заданные углы за требуемое время, а также высокую равномерность и плавность вращения вала исполнительного двигателя.

Таблица 1. Результаты экспериментальной проверки электропривода оси R ЦСН

Наименование проверки	Требования	Результат
Время переброса на 60° по оси R	Не должно превышать 10 с.	7,8-8,0 с.
Время переброса на 2° по оси R	Не должно превышать 1,8 с.	1,6-1,7 с.
Количество переходов через знак при успокоении привода после остановки движения в течение 6 с.	Не должно превышать 3 раз	1 раз
Отработка скорости $300''/\text{сек}$ в диапазоне углов оси R от 20° до 155°	не хуже $40''/\text{сек}$	$10''/\text{сек}$
Отработка скорости $900''/\text{сек}$ в диапазоне углов оси R от 20° до 155°	не хуже $40''/\text{сек}$	$11''/\text{сек}$
Отработка скорости $1800''/\text{сек}$ в диапазоне углов оси R от 20° до 155°	не хуже $40''/\text{сек}$	$12''/\text{сек}$

По результатам проведенных испытаний была подтверждена возможность использования только одного канала грубого наведения кинематической схемы, более высокая жесткость которого позволяет снизить влияния внешних возмущений на качество воспроизведения заданных параметров движения орбитальной оси телескопа ЦСН.

В приложениях приведены фотографии разработанного КЭП, описание способа организации взаимодействия контроллера электропривода и ЭВМ, описание средств программирования КЭП, методика испытаний штатной системы наведения, официальные свидетельства о регистрации ПО, акт внедрения ПО в учебный процесс, акты об использовании КЭП и ПО, акт технической проверки КЭП на соответствие предъявляемым требованиям.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. В результате анализа основных задач ЦСН определен комплекс требований к современной системе управления движением орбитальной осью телескопа. Установлено, что обеспечение требуемых точностных и регулировочных характеристик электроприводов ЦСН возможно без изменения ее кинематической схемы при использовании штатных двигателей путем замены аналоговых систем управления на прецизионные импульсно-фазовые, построенные на базе современной микропроцессорной техники управления.

2. Установлено, что применение контура цифровой фазовой синхронизации с МЧФД и оптического датчика положения с аппаратным умножением меток позволяет значительно расширить диапазон регулирования скорости, а использование быстродействующего МК со встроенными интерфейсами – уменьшить количество элементов схемы, перераспределить функции управления электроприводом в сторону их программной реализации и расширить функциональные возможности КЭП ЦСН.

3. Исследованы возможности системы управления с традиционными и нечетким регуляторами фазовых переменных. Показано, что совместное применение регуляторов позволяет получить желаемый переходный процесс с меньшим перерегулированием и с более высоким быстродействием, что повышает качество управления и снижает зависимость настроек регуляторов от изменяемых параметров объекта управления.

4. Для уменьшения ударных нагрузок в приводном механизме орбитальной оси оптического телескопа разработана система программного ограничения скорости в зависимости от пути, которая позволяет формировать трапециидальную кривую разгона/торможения двигателя и обеспечивать плавность в начале и в конце движения.

5. Разработаны программное обеспечение верхнего уровня для программирования контроллера, наладки и тестирования электропривода телескопа без дополнительных программно-аппаратных средств с возможным осуществлением удаленной работы, а также адресные команды МК для обеспечения двустороннего обмена данными между ЭВМ и КЭП ЦСН. Создано отдельное хранилище текстовых и медиа данных для разработанной информационной системы подготовки и просмотра интерактивных руководств для электропривода с возможностью обновления данных через Интернет.

6. В результате опытных испытаний установлено, что созданный на основе современной элементной базе контроллер электропривода телескопа позволил существенно сократить аппаратную часть существующей аналоговой системы, значительно уменьшить время настройки, повысить стабильность работы системы наведения, уменьшить время успокоения привода, снизить ударные нагрузки в приводном механизме, расширить диапазон регулирования скорости, что сделало возможным применение только одного канала "грубого наведения" кинематической схемы более высокая жесткость которого позволяет снизить влияние возмущений на точность движения орбитальной оси телескопа.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ

в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. **Фалеев, М.В.** Моментный электропривод систем наведения мобильных робототехнических комплексов / М.В. Фалеев, С.Г. Самок, П.М. Поклад // Вестник ИГЭУ. – 2008. – Вып. 3. – С. 17-19.

2. **Поклад, П.М.** Анализ методов интеллектуализации управления сложными динамическими объектами/ П.М. Поклад // Вестник ИГЭУ. – 2010. – Вып. 2. – С. 76-79.

3. **Поклад, П.М.** Программные средства управления электроприводами / П.М. Поклад // Вестник ИГЭУ. – 2010. – Вып. 4. – С.75-79.

4. **Поклад, П.М.** Анализ и разработка системы отображения интерактивных электронных технических руководств для промышленных изделий / П.М. Поклад // Вестник ИГЭУ. – 2011. – Вып. 1. – С.73-75.

в прочих изданиях:

5. **Фалеев, М.В.** Повышение эффективности эксплуатации гибридных электроприводов на базе CALS-технологий/ М.В. Фалеев, Николаев И.Б., Поклад П.М.// 13-ая междунар. н-т. конф. студентов и аспирантов "Радиотехника, электротехника и энергетика" – М.: МЭИ. – 2007. – Т.2 – С. 134-136.

6. **Поклад, П.М.** Алгоритмы позиционирования гибридных систем / П.М. Поклад // Тезисы докладов междунар. н-т. конф. "Состояние и перспективы развития электротехнологии" (XIV Бернардовские чтения). – Иваново: ИГЭУ. – 2007. – Т.2. – С. 172.

7. **Фалеев, М.В.** Применение объектно-ориентированного моделирования при разработке мехатронных систем/ М.В. Фалеев, П.М. Поклад // Труды VIII междунар. н-т. конф. "Новые информационные технологии и системы" – Пенза: ПГУ. – 2008. – Ч. 2. – С. 31-36.

8. **Фалеев, М.В.** Электроприводы переменного тока с цифровой фазовой синхронизацией / М.В. Фалеев, П.М. Поклад, С.Г. Самок // Сборник трудов XIV междунар. н-п. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых "Современные техника и технологии" - Томск: ТПУ. – 2008. – Т.1. – С. 415 - 417.

9. **Фалеев, М.В.** Моделирование гибридных электроприводов переменного тока/ М.В. Фалеев, С.Г. Самок, П.М. Поклад // Труды междунар. н-т. конф. "Компьютерное моделирование 2008" – СПб: Изд-во Политехн. ун-та. – 2008. – с. 38-40.

10. **Фалеев, М.В.** Высокоточные электроприводы для испытательной техники / М.В. Фалеев, П.М. Поклад, А.Н. Ширяев // Всероссийская междунар. н-т. конф. «Электро - 2009» – Уфа: УПУ, 2009. – Т.1. – С. 121 - 124.

11. **Поклад, П.М.** Разработка программного комплекса информационной поддержки жизненного цикла электроприводов/ П.М. Поклад // Материалы междунар. н-т. конф. «Автоматизация: проблемы, идеи, решения» (АПИР-15) – Т.: ТулГУ. – 2010. – Т.2 – С. 111-116.

12. **Поклад, П.М.** Исследование систем электропривода с нечеткими регуляторами / П.М. Поклад // Материалы V всерос. науч.-практ. конф. "Повышение эффективности энергетического оборудования" – Иваново: ГОУ ВПО Иван. госуд. энер. унив. – 2010. – С. 383-388.

13. **Поклад, П.М.** Особенности применения fuzzy-регуляторов в цифровых системах наведения / П.М. Поклад, А.А. Киселев // XXXIX Неделя науки СПбГПУ: материалы Международной науч.-практ. конф. – СПб.: СПбГПУ. – 2010. – Ч. VIII – С. 71-73.

14. **Поклад, П.М.** Программная поддержка жизненного цикла импульсно-фазовых электроприводов в рамках CALS-технологии. / П.М. Поклад // Вестник научно-промышленного общества. – М.: АЛЕВ-В. – 2010. – Вып. 15. – С.13-20.

15. **Поклад, П.М.** Использование CALS-технологий в цифровых системах наведения / П.М. Поклад, А.А. Киселев // 17-ая междунар. н-т. конф. студентов и аспирантов "Радиотехника, электротехника и энергетика" – М.: МЭИ. – 2010. – Т.2 – С. 162-163.

16. **Поклад, П.М.** Разработка программных средств для подготовки электронных технических руководств импульсно-фазовых электроприводов / П.М. Поклад // Сборник научных трудов междунар. н-т. конф. "Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий" (АПЭЭТ-11). – Екатеринбург: изд-во ФГАОУ ВПО УрФУ. – 2011. – С. 238-243.

свидетельства на программные продукты:

17. **Поклад, П.М.** Система настройки импульсно-фазового электропривода "Configurator PPL Drive 6.0" / А.А. Киселев, П.М. Поклад // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2010615959. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 13.09.2010.

18. **Поклад, П.М.** Система тестирования и диагностики импульсно-фазового электропривода "Tester PPL Drive 4.0" / А.А. Киселев, П.М. Поклад // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2010615958. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 13.09.2010.

19. **Поклад, П.М.** Загрузчик кодов программ микроконтроллеров "Code Uploader PPL Drive 3.0" / А.А. Киселев, П.М. Поклад // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2011610718. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 11.01.2011.

20. **Поклад, П.М.** Контент менеджер системы поддержки жизненного цикла импульсно-фазовых электроприводов "Content Editor PPL Drive Suite 2.0" / П.М. Поклад // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2011612095. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 11.03.2011.

21. **Поклад, П.М.** Система отображения интерактивных электронных технических руководств импульсно-фазовых электроприводов "Content Browser PPL Drive Suite 2.0" / П.М. Поклад // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2011613050. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 18.04.2011.