

УДК 681.587.72:520.22

Прецизионные интеллектуальные электроприводы для систем слежения и наведения телескопов и визуальные программные комплексы поддержки их жизненного цикла.

П.М. Поклад

Аннотация

В работе представлено описание структуры и принципа работы микропроцессорного электропривода на базе контура цифровой фазовой синхронизации для управления оптической осью телескопа и приведено описание программного обеспечения поддержки его жизненного цикла.

Ключевые слова

прецизионный электропривод, телескоп, микроконтроллер, автоматическое управление, fuzzy-регулятор, импульсно-фазовая система, дискриминатор.

1. Введение

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.

2. Особенности объекта управления

Модернизируемая цифровая система наведения (ЦСН) представляет собой мехатронный комплекс весом в 33 тонны способный совершать сложные движения (рис. 1).



Рис. 1. Общий вид цифровых систем наведения

ЦСН, разработанная Красногорским заводом им. С. А. Зверева (КМЗ), предназначена для автономного автоматического обнаружения космических объектов (КО) на высотах 2000 - 40000 км, сбора по ним координатной и фотометрической информации, расчета параметров движения и передачи результатов обработки на командные пункты.

ЦСН включает в себя уникальный оптический телескоп (ОТ), фотокамеры, анализаторы, системы электропривода (ЭП) для управления тремя осями, и уникальной конструкции основания и поворотной-качающейся опоры на гидростатических опорах (ГО) с мощной системой нагнетания и охлаждения масла (рис. 2).

Конструктивно ЦСН состоит из опорно-поворотного устройства (ОПУ), смонтированного на специальной площадке, расположенной на гидравлических опорах. ОПУ представляет собой гидростатический подшипник, который за счет образования тонкого слоя масляной пленки обеспечивает высокую плавность и точность отработки движений в горизонтальной плоскости. На ОПУ расположено основание, которое вращается вокруг вертикальной оси на 270° в плоскости горизонта. Данная ось называется азимутальной осью и обозначается, как ось А. На основании

смонтирована поворотнo-качающаяся опора, имеющая U-образную форму. Вращение опоры происходит в вертикальной плоскости при разгруженном подшипнике оси вращения, благодаря базированию всей конструкции на ГО. Данная ось называется полярной осью и обозначается как ось L. Оптический телескоп общим весом в 2,5 тонны, смонтированный на поворотнo-качающейся опоре, способен совершать перемещения относительно оси на 80° в обе стороны. Данная ось вращения телескопа называется орбитальной (оптической) осью и обозначается как ось R.

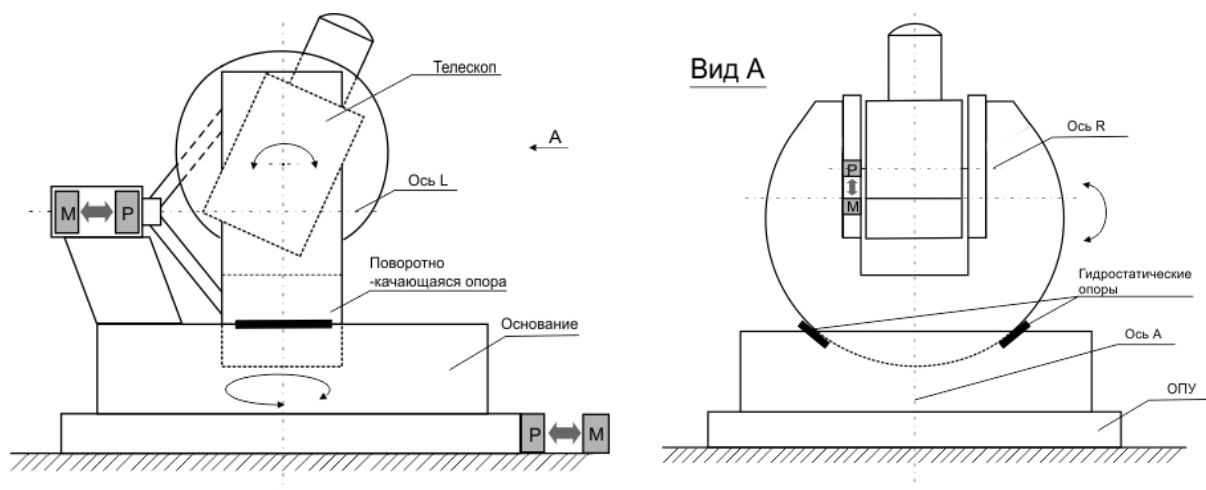


Рис. 2. Схема ЦСН

Каждая из 3-х осей ЦСН имеет по 2 отдельных двигателя постоянного тока независимого возбуждения (ДПТНВ) для канала точного (ТН) и грубого наведения (ГН), основные характеристики которых приведены в табл. 1.1-1.2.

Таблица 1. Характеристики штатных двигателей ЦСН

Тип электро-двигателя	Наименование параметра						
	Ном. мощность, кВт	Ном. напряжение, В	Ном. частота, об/мин	Ном. ток якоря, А	Макс. мощность возбуж., Вт	КПД, %	Напряжение возбуж., В
2ПБН 112ЛГ	0,37	220	1000	2,26	75	66,0	110

2ПБН 112МГ	0,55	220	1000	3,20	99	68,5	110
------------	------	-----	------	------	----	------	-----

Таблица 2. Характеристики механизмов ЦСН

Режим	Двигатель	Редукция редуктора, коэффициент			Макс. скорости град/сек	Дискретность управления по скорости	
		Ось «А»	Ось «L»	Ось «R»		разряды	
					есть	желаемое	
Грубое наведение	2ПБН112МГ	720	720	720	10	8	10
Точное наведение	2ПБН 112LG	-	-	12.000	0,5	10	11-12

Штатная аналоговая система управления электроприводом оси R, разработанная еще в 80-х годах прошлого века, не обеспечивала требуемый диапазон регулирования скорости, необходимый для обеспечения быстрых и медленных перемещений оси R с низкой и высокой точностью соответственно, что послужило основанием для разработки так называемых каналов "точного" (ТН) и "грубого" (ГН) наведения, реализованных в виде многоступенчатой кинематической схемы.

В режиме ГН решающую роль играет скорость отработки перемещения, а не точность стабилизации скорости, как это необходимо в режиме ТН. Полный динамический диапазон по скорости для оси R составляет от 0,5 °/сек (0,07 об/сутки) до 10 °/сек (2333 об/сутки) или около 36000:1. Канал ГН служит, прежде всего, для оперативного «переброса» оси R телескопа из одного положения в другое. Канал ТН служит для обеспечения сопровождения КО с заданной скоростью, «движения неба» и автосопровождения – реализуемого программно посредством оперативного управления текущей скоростью. В канале ТН важна точность отработки скорости и хороший момент удержания скорости в силу ветровых нагрузок.

Для управления ЦСН используется управляющий вычислительный комплекс (УВК), представляющий собой Супер-ЭВМ типа "Эльбрус". Обмен данными между ЭП

ЦСН осуществляется по CAN-сети с применением специальных интерфейсных CAN-модулей (рис. 1.3).

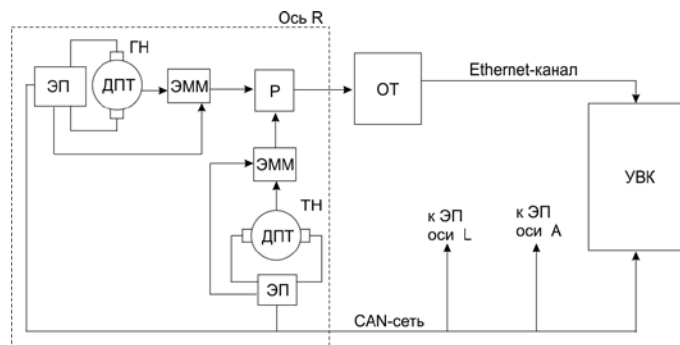


Рис. 3. Общая схема управления оптическим телескопом ЦСН

3. Цели работы

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.

3.1. Определение требований к электроприводу орбитальной оси телескопа

На основе проведенного анализа выдвигаемых к ЦСН требований и режимов ее работы сформулированы следующие требования к разрабатываемому КЭП: диапазон регулирования скорости – 36000:1; минимальная скорость – 1 "/сек; максимальная скорость – 10 угл град/сек; максимальное ускорение – 3.5 угл град/с²; стабильность характеристик; малая чувствительность к действию внешних дестабилизирующих факторов и условий работы; обеспечение специфических режимов работы ЦСН, таких как работа с постоянными скоростями слежения, быстрого перемещения оси телескопа, или старт-стопные режимы работы ЭП при секторном сканировании пространства; возможность работы в составе интегрированных систем управления; использование стандартных интерфейсов связи.

3.2. Вариант построения системы управления электропривода

Из множества возможных способов реализации приводных устройств опорно-поворотных осей оптических телескопов можно выделить достаточно перспективное направление развития систем управления, основанное на использовании принципов фазовой синхронизации скорости, реализованных посредством импульсно-фазовых электроприводов (ИФЭП). В работах Фалеева М.В. и Трахтенберга Р.М. показано, что высокие качественные показатели управления параметрами движения обеспечивают электроприводы, построенные на базе контура фазовой синхронизации (КФС), оперирующего с импульсными последовательностями, чем достигается идеальный астатизм по средней частоте выходного сигнала датчика положения. При этом сам принцип работы такой системы позволяет только изменением характеристик импульсного задающего сигнала, таких как частота и число импульсов, реализовать перемещение управляемого объекта в заданную точку пространства, что создает предпосылки для его использования при позиционировании механизма.

На рис. 4 представлена функциональная схема КЭП ЦСН, полученная по принятой концепции построения прецизионных электроприводов, предназначенных для использования в цифровых системах наведения.

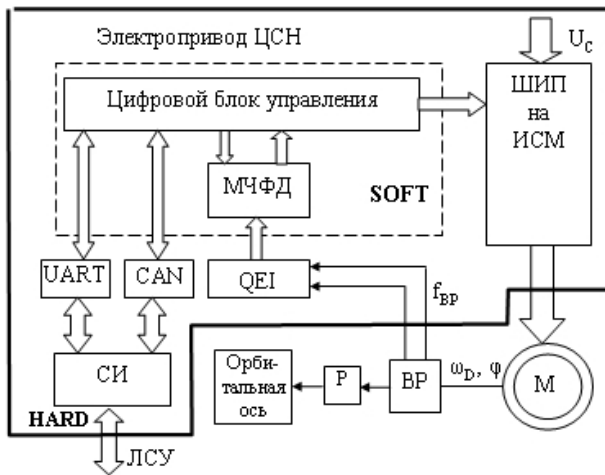


Рис. 4. Структурная организация контроллера электропривода

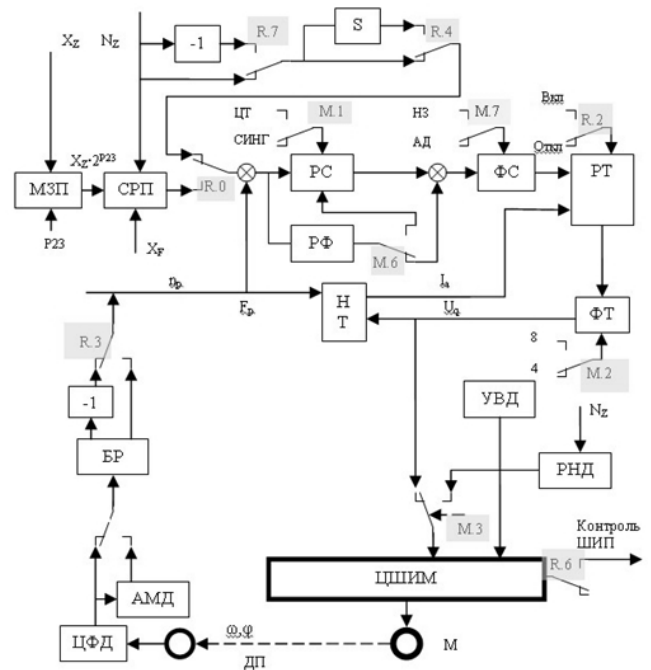


Рис. 5. Схема программных регуляторов контроллера электропривода

Блок управления КЭП ЦСН состоит из МК и широтно-импульсного преобразователя (ШИП) на базе интеллектуального силового модуля (ИСМ). Система управления включает в себя программные (SOFT) и аппаратные (HARD) средства. Последние используются для организации взаимодействия регулятора с входящей в состав электропривода периферией: ШИП, датчиком положения и локальной сетью управления (ЛСУ) технологическим агрегатом через связной интерфейс (СИ).

В ЭП 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} определяют режим работы интерфейса оптического датчика (QEI). МЧФД обеспечивает передачу цифрового кода, соответствующего величине фазовой ошибки, в цифровой блок управления.

Обобщенная функциональная схема программных регуляторов КЭП ЦСН представлена на рис. 5, которая представляет собой двухконтурную цифровую систему

управления, обеспечивающую управление положением орбитальной оси в функции фазового рассогласования частотных сигналов задания.

На представленной схеме символами Mx и Rx обозначены логические переключатели необходимые для быстрого изменения конфигурации структуры системы управления. На схеме приняты следующие обозначения: СРП – следящий регулятор положения, обеспечивающий позиционирование вала двигателя; РС – нечеткий регулятор скорости с назначаемыми [синглетон (SF) или центра тяжести (COA)] методами дефаззификации; РФ – нечеткий регулятор фазы с синглетон дефаззификатором; РТ – регулятор тока; ФТ – фильтр контура тока; ФС – фильтр регулятора скорости; НТ – наблюдатель тока; РНД – блок управления напряжением возбуждения двигателя; БР – блок выбора разрешения датчика положения; АМД – аппаратный множитель добротности; ЦФД – цифровой фильтр датчика положения; S – формирователь S-тахограммы разгона/торможения; УПЧ – блок формирования частоты и напряжения инвертора; ЦШИМ – блок централизованной широтной импульсной модуляции; (-1) – блок инверсии входного сигнала; МЗП – множитель сигнала задания перемещения.

Указанный вариант построения КЭП ЦСН предполагает выполнение практически всех функций управления встроенным в контур регулирования МК (рис. 6).

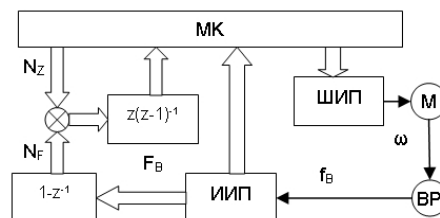


Рис. 6. Принцип построения КЭП ЦСН с микроконтроллерным управлением

Это 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.

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.

3.3. Традиционные и нечеткие регуляторы фазовых переменных

Проведенный анализ интеллектуальных технологий управления 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.

Необходимость обеспечения предельного быстродействия и приемлемого качества управления электропривода орбитальной оси телескопа при наличии фактора неопределенности, требует применения нелинейных и адаптивных регуляторов. Одним из способов решения этой задачи является использование нечетких регуляторов (НР). Применение НР для управления нестационарными

и нелинейными объектами показывает их высокую эффективность и в ряде случаев существенные преимущества перед линейными цифровыми регуляторами. Основными параметрами цифровых НР, при которых производится их синтез и расчет, являются, во-первых, количество и форма функций принадлежности лингвистических величин и, во-вторых, диапазоны масштабирования входных и выходной лингвистических переменных, таких как ошибка по положению вала, ее производная и интеграл.

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. 7) содержит блоки фаззификации, дефаззификации и логического заключения, выполняемого на основе заложенной в алгоритм регулятора базы знаний.

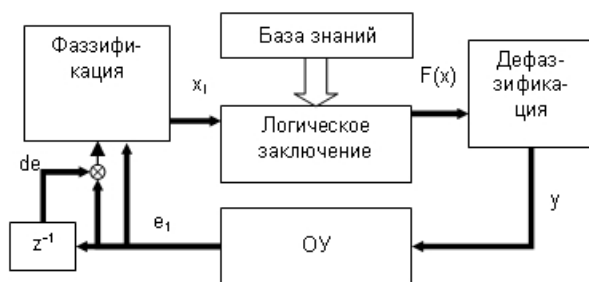


Рис. 7. Блочная структура системы нечеткого управления

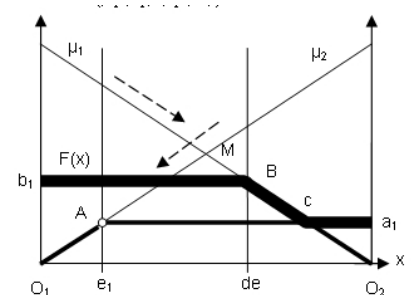


Рис. 8. Формирование нечеткого множества

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 дана на рис. 8

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

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

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 A и B 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 дефаззификации (ДФ) преобразует нечеткое результирующее множество R в скалярную величину u 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 соq-алгоритмов связана с выполнением большого объёма 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 M , определяющей пересечение ФП $\mu_1(x)$ и $\mu_2(x)$. В этом случае выходной сигнал y НР определяется по следующему выражению

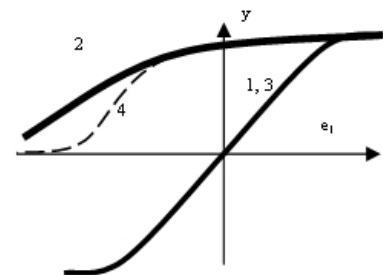


Рис. 9. Выходные характеристики НР: 1, 3 – МЭП и соq-ДФ при $de=0$

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

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

На рис. 9 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, аналогичную полученной при использовании более сложных методов выполнения этой операции. При предельных величинах сигнала de наблюдается расхождение выходных характеристик определенных для разных способов ДФ. Это свидетельствует о том, что предлагаемый МЭП-метод характеризуется по сравнению с сог- и соа-методами меньшей степенью подавления выходного сигнала в режимах выхода из граничных состояний.

В отличие от широко используемых сог- 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.

3.4. Программные ограничители скорости движения оси телескопа

Разработан программный алгоритм ограничения темпа изменения частоты задающего сигнала, реализующий функции совместной работы датчиков интенсивности первого (ЗИ-1) и второго (ЗИ-2) порядков с заданным условием их переключений, позволяющий формировать трапециидальную тахограмму разгона/торможения двигателя (рис. 10, б). Функциональная схема разработанного программного узла представлена на рис. 10, а.

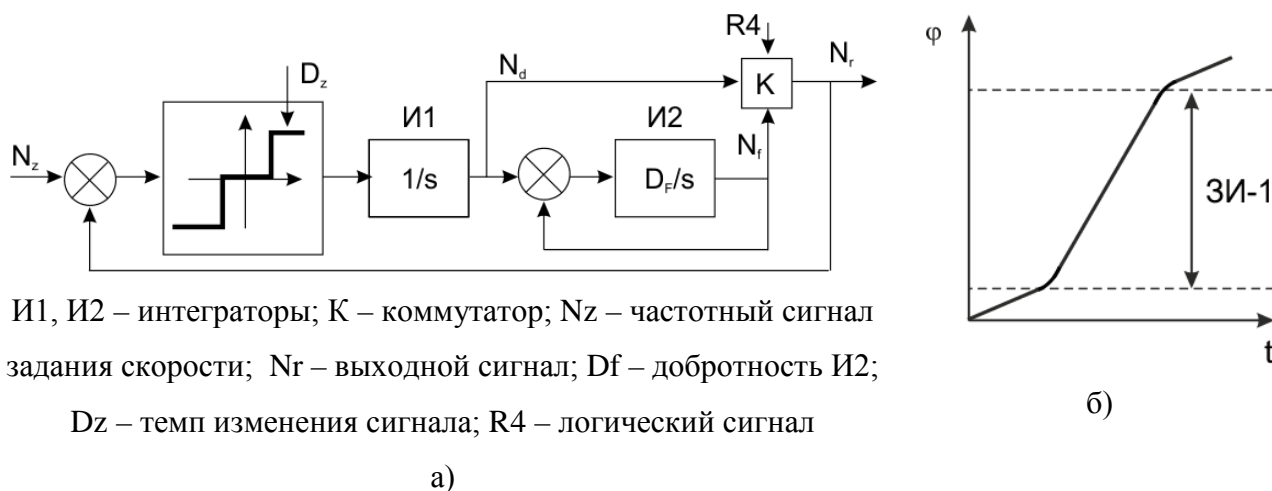


Рис. 10. Программный узел: а) функциональная схема узла; б) вид формируемой кривой

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 при окончании разгона представлены на рис. 11-12, определяемой по выражению

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

где V – скорость (дискрет/пер); PL – темп торможения; T – постоянная времени ЗИ второго порядка.

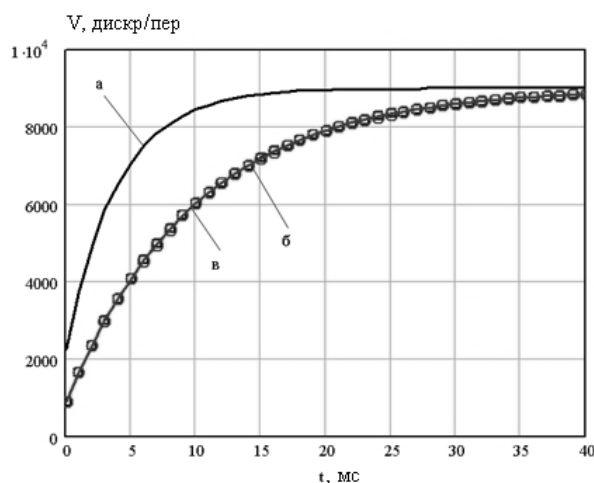


Рис. 11. График изменения скорости для функции $V_{22}(V,T,PL,t)$ при $V=9000$: а) $T=4$, $PL=10$; б) $T=10$, $PL=10$; в) $T=10$, $PL=30$

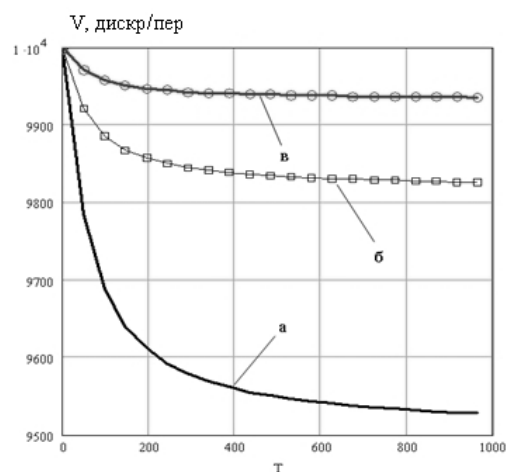


Рис. 12. Значение скорости в конце разгона ($V=10000$) при времени окончания процесса равной: а) $3T$; б) $4T$; в) $5T$

3.5. Объектно-ориентированное программное обеспечение (ПО)

Для решения практических задач, таких как, наладка, тестирование, программирование и документирование системы электропривода, а также, чисто теоретических задач – моделирование и ее анализ были разработаны компьютерные средства поддержки жизненного цикла ИФЭП, функционирующих на базе обычного

персонального компьютера без дополнительных аппаратных и программных средств. Работа всего программного комплекса базируется на использовании собственной системы адресных команд КЭП, интегрированных в него интерфейсов связи типа CAN, RS-232 и специального загрузчика.

3.5.1 Аппаратно-алгоритмические средства компьютерной поддержки электропривода

Для обеспечения программного обмена данными с платой КЭП и ЭВМ с учетом логической структуры организации памяти МК разработана система адресных команд (АК), с помощью которой обеспечивается задание параметров и структуры регуляторов, конфигурирование аппаратных средств, аппаратная диагностика, командное управление движением и задание режимов работы электропривода.

Все АК распределены на 3 группы: 1) передача данных; 2) запись данных; 3) прямой вызов процедур. Команды передачи данных позволяют записывать в МК различные параметры, а также принимать из памяти МК содержимое ячеек и регистров. Команды записи данных фиксируют принятую информацию в различных областях памяти МК. Прямой вызов процедур позволяет вызывать из памяти МК высокоприоритетную команду, например, реверс, режим позиционирования, отключение двигателя от сети.

АК организованы в виде командного слова с 16 двоичных разрядов, разделенных на два байта. Оно поступает от ЭВМ в виде последовательности двух кадров, первый из которых содержит восемь старших разрядов командного слова. После получения всего слова от КЭП передается контрольный байт, значение которого определяется видом командного слова. На рис. 13. показана последовательность обмена информацией между ЭВМ и КЭП. Пунктиром показаны элементы передаваемого кадра, наличие которых зависит от вида передаваемой команды.

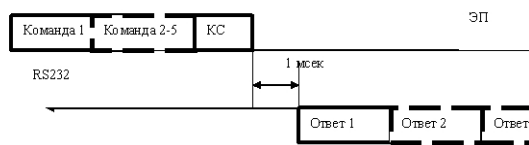


Рис. 13. Временные диаграммы обмена



Рис. 14. Алгоритм обмена данными

Разработан алгоритм обмена данными между КЭП и ЭВМ по последовательному каналу связи схематично показанный на рис. 14. Все операции настройки и управления электропривода, съем информации о параметрах и режимах его работы обеспечивают дистанционный пульт управления либо внешняя АСУ ТП, в том числе и персональный компьютер, с соответствующим установленным программным обеспечением.

3.5.2. Программный комплекс компьютерной поддержки жизненного цикла ИФЭП

Предлагаемая система поддержки жизненного цикла такого электропривода реализованная 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 программ с СОМ-портом ЭВМ осуществляется с помощью программного интерфейса TComPort, который взаимодействует со встроенными в Windows драйверами СОМ-порта (рис. 15).

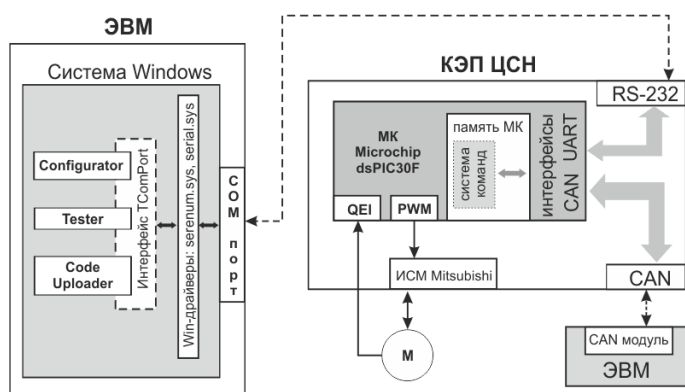


Рис. 15. Схема взаимодействия КЭП и ЭВМ

Объектно-ориентированный комплекс состоит из следующих программ:

1. Configurator PPL Drive (свидетельство РФ № 2010615959) для наладки, мониторинга и настройки ЭП;
2. Tester PPL Drive (свидетельство РФ № 2010615958) для испытаний и тестирования ЭП;

3. Code Uploader PPL Drive (свидетельство РФ № 2011610718) для модернизации параметров и программирования ЭП;
4. Simulator PPL Drive (свидетельство РФ № 2010615957) и Research PPL Drive (свидетельство РФ №2010617730) для имитационного моделирования ЭП;
5. Content Browser PPL Drive Suite (свидетельство РФ № 2011613050) для просмотра интерактивных электронных технических руководств (ИЭТР);
6. Content Editor PPL Drive Suite (свидетельство РФ № 2011612095) для создания, компиляции и редактирования ИЭТР.

На рис. 16 представлена диаграмма основных этапов жизненного цикла ИФЭП с соответствующими программами.



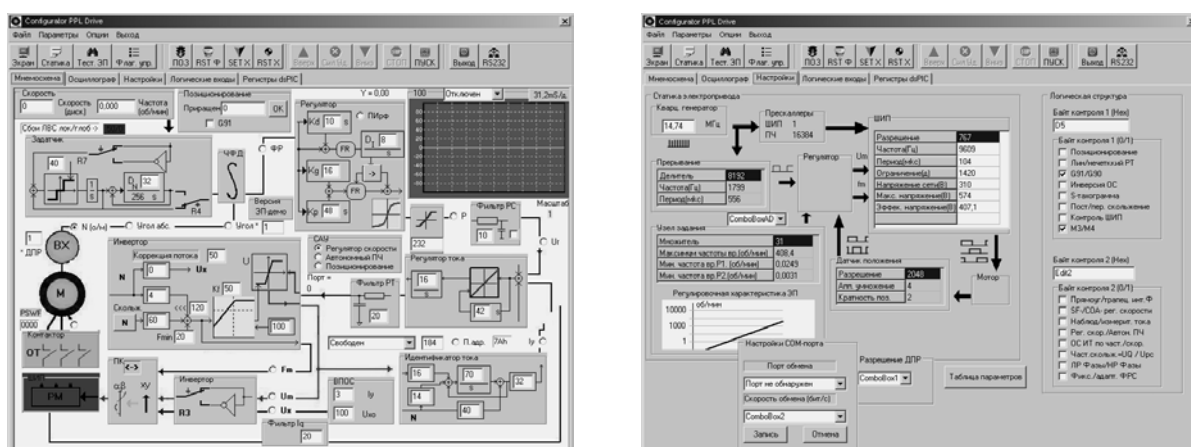
Рис. 16. Этапы жизненного цикла импульсно-фазовых электроприводов

Все программы осуществляют безбумажный обмен полученными данными, в виде XML-документов, файлов графиков и

текстовых документов. Единый формат представления данных, в процессе функционирования программного комплекса, позволяет эффективно использовать полученные данные.

3.5.3. Настройка электроприводов - Configurator PPL Drive

Для настройки ЭП ЦСН была разработана программа Configurator PPL Drive (рис. 17) с графическим интерфейсом, состоящим из 8 диалоговых окон, панели управления и меню. Для выполнения основной задачи программа обеспечивает выполнение 3-х базовых функций (рис. 18): ввод данных; организация приема и передачи данных между КЭП ЦСН и ЭВМ; отображение данных.



а)

б)

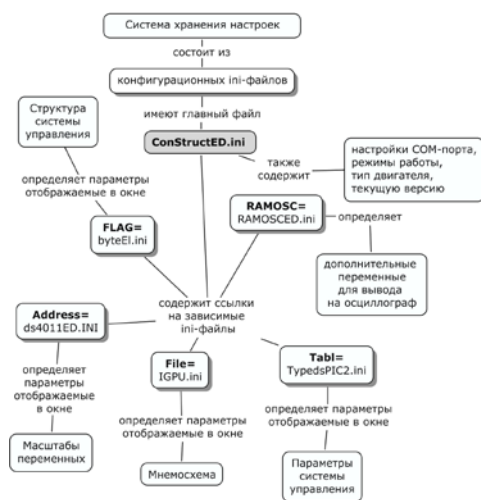
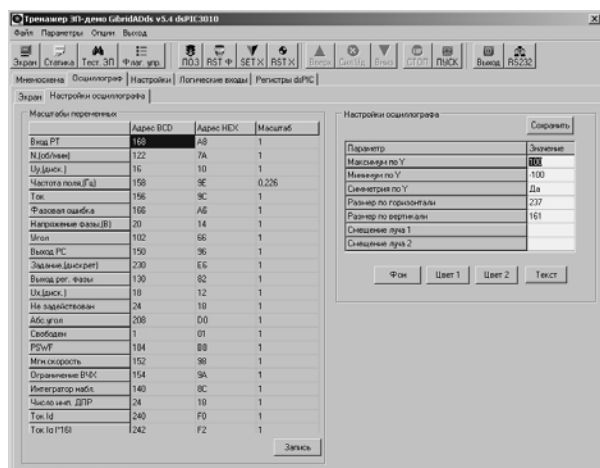
Рис. 17. Интерфейс Configurator: а) окно мнемосхемы; б) окно настроек



Рис. 18. Блок-схема выполняемых базовых функций программой Configurator

Программа работает в 2-х режимах: **Online** – управление подключенным КЭП ЦСН; **Offline** – режим имитационного тренажера. В **online-режиме** программа осуществляет взаимодействие с КЭП ЦСН, передавая команды управления в память МК и получая сигнал обратной связи с оптического датчика положения, распложенного на валу двигателя. В **Offline-режиме** программа работает в имитационном режиме. При запуске программа проверяет наличие связи с КЭП ЦСН и в случае получения своевременного ответа от нее переходит в **online-режим** работы.

Программа позволяет выполнять: задание параметров регулятора и аппаратных средств; контроль данных; отправку команд; автоматическую обработку данных; настройку средств визуализации (рис. 19, а) и резервирование параметров; задание параметров канала связи; просмотр памяти МК; управление ЭП ЦСН.



а) б)

Рис. 19. Элементы Configurator: а) настройка визуализации; б) схема ini-файлов

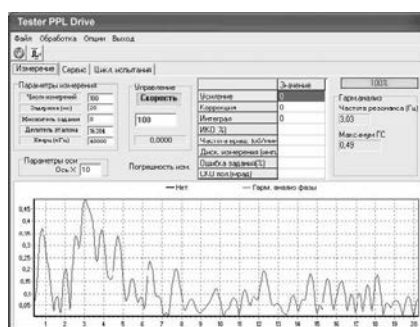
Для хранения настроек в программе предусмотрено 6 ini-файлов в которых содержатся (рис. 19, б): наименование логических опций; головная запись; наименование, адреса параметров регулятора;

значения опций управления; наименования, масштабы и адреса переменных, выводимых на осциллограф; расшифровка используемых в данной версии программы опций управления. Обозначенные на рисунке жирным шрифтом названия переменных, находящихся в главном ini-файле, являются ссылками на другие ini-файлы.

3.5.4. Тестирование электроприводов - Tester PPL Drive

Для определения точностных характеристик ЭП ЦСН в квазиустановившихся режимах работы создана программа Tester, обеспечивающей измерение: среднего значения частоты вращения вала за выбранный промежуток времени, интегральной квадратичной ошибки стабилизации частоты вращения, среднеквадратичной погрешности стабилизации положения вала, автоматическое определение точностных характеристик в заданном диапазоне частоты вращения, определение гармонического состава погрешности стабилизации положения вала, определение гармонического состава погрешности стабилизации угловой скорости.

Интерфейс программы организован в виде окна с 3-мя вкладками: "Измерение", "Сервис" и "Цикл. Испытания". Вкладка "Измерение" (рис. 20, а) предназначена для задания режимов измерения, запуска цикла измерения и представления его результатов в цифровом и графическом виде.



а)

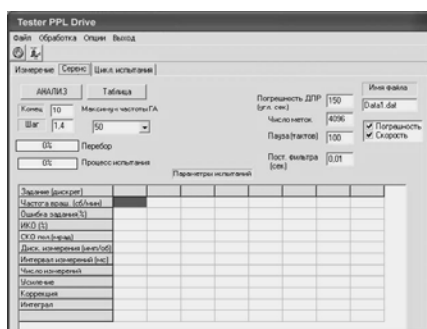


б)

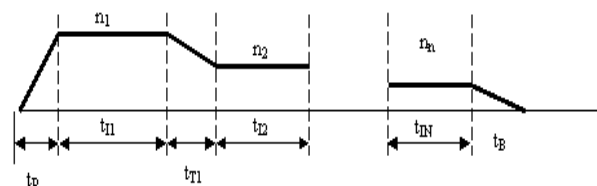
Рис. 20. Однократное тестирование: а) вкладка измерение; б) цикл тестирования

Цикл процесса тестирования осуществляется по циклограмме (рис. 20, б) и состоит из следующих этапов: разгон двигателя до заданной частоты вращения вала, измерение параметров движения с заданным интервалом, останов двигателя в режиме свободного выбега.

На рис. 21, а показан вид вкладки "Сервис", предназначенной для задания дополнительных параметров испытания и проведения многократных испытаний ЭП ЦСН с целью автоматизированного определения точностных показателей его работы в заданном диапазоне регулирования частоты вращения. При проведении многократных испытаний используется, представленная на рис. 21, б, циклограмма изменения частоты вращения вала.



а)



б)

Рис. 21. Многократное тестирование: а) вкладка сервис; б) циклограмма многократных испытаний

Она состоит из повторяющихся испытаний с уменьшающимися частотами вращения вала. При этом за начальное значение частоты вращения принимается ее величина, использованная при последнем однократном испытании.

3.5.5. Перепрограммирование электроприводов - Code Uploader PPL Drive

Программа Code Uploader (рис. 22) 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.

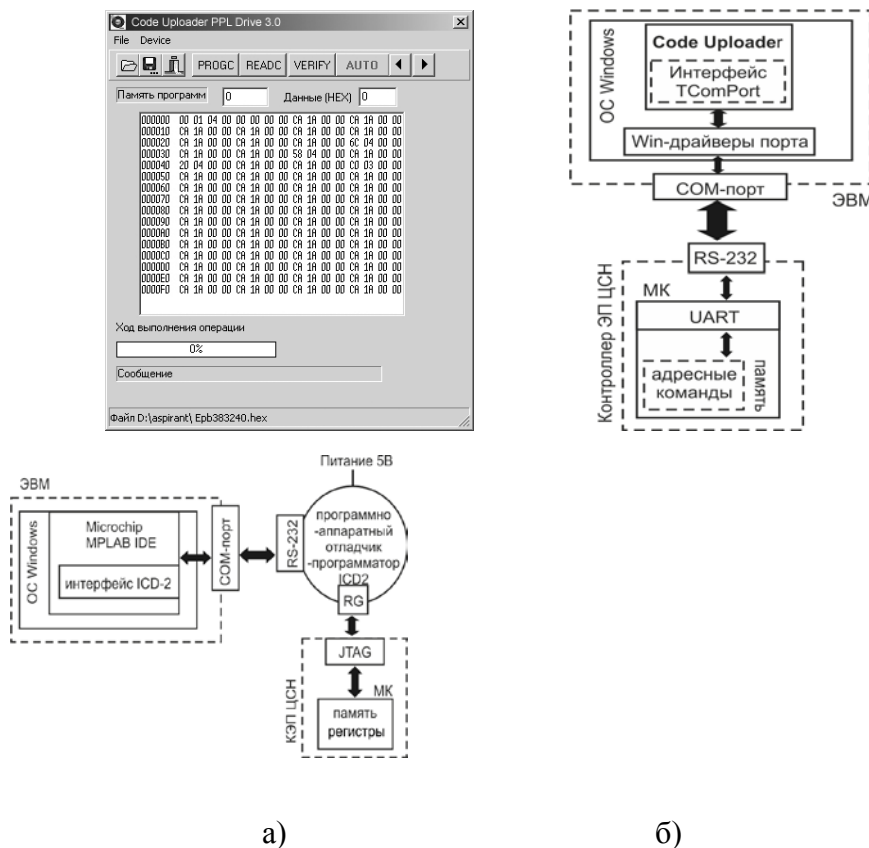


Рис. 22. Программа Code Uploader: а) вид основного окна; б) схема взаимодействия систем; в) схема программирования КЭП средствами Microchip

Благодаря программе, отпадает необходимость в применении программно-аппаратного отладчика Microchip

MPLAB ICE2 и интегрированной среды разработки Microchip MPLAB IDE v.7.6. Программа имеет встроенные функции программирования, контроля, поиска неисправностей и технического обслуживания.

3.5.6. Моделирование электроприводов - Simulator PPL Drive и Research PPL Drive

Принцип действия, особенности построения ИФЭП с микропроцессорным управлением и характеристики элементов электропривода определяют системы такого класса, как нелинейные, что является следствием цифровой обработки данных, широтно-импульсной модуляции сигналов, используемых силовых преобразователей, двигателей, датчиков и режимов их работы. Перечисленные особенности ИФЭП не позволяют получить достоверные результаты исследования статических и динамических характеристик электропривода при пренебрежении дискретностью системы. При этом аналитические методы расчета динамических характеристик в переходных и квазиустановившихся режимах приводят к получению математически сложных выражений и малоинформативных результатов. Поскольку для решения практических задач, связанных с исследованием и проектированием ИФЭП, необходима информация о статических и динамических свойствах реальной неидеализированной

системы, возникает необходимость разработки цифровой имитационной модели, позволяющей с помощью ЭВМ выполнять расчет переходных процессов в ИФЭП.

Процесс разработки адекватной оригиналу имитационной модели неразрывно связан с решением задачи о выборе рационального метода моделирования, обеспечивающего высокое быстродействие, простоту построения и удобство применения модели для расчета переходных процессов в ИФЭП. Использование в ИФЭП элементов с различными принципами действия обуславливает многообразие подходов к моделированию. В то же время разработаны и успешно применяются на практике универсальные системы моделирования, ориентированные на исследование характеристик широкого класса динамических объектов, такие как Mathcad, Matlab..

Однако большинство таких программных комплексов основано на использовании методов численного интегрирования, применение которых для исследования ИФЭП не позволяет получить высокое быстродействие цифровой имитационной модели. Поэтому предлагается система Simulator PPL Drive (рис. 23) и Research PPL Drive (рис. 24) для моделирования и исследования ИФЭП, основанная на использовании численно-аналитического метода пространства состояний, позволяющего

рассчитать значения переменных в дискретные моменты времени, соответствующие моментам переключения отдельных блоков. Выбранный метод исключает промежуточные вычисления без потери точности расчета.

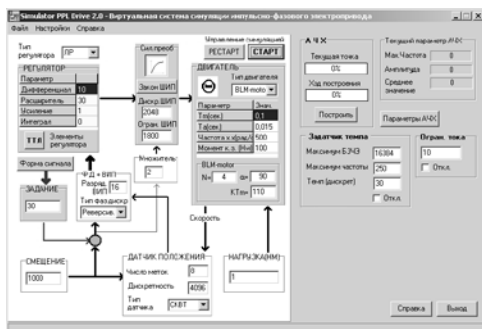


Рис. 23. Вид основного окна программа Simulator

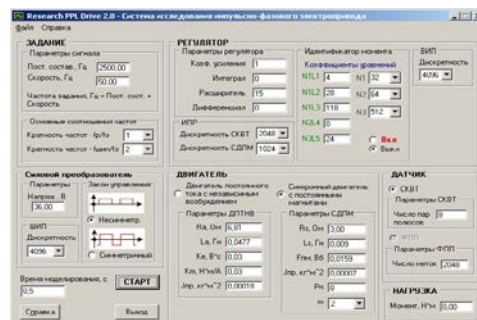


Рис. 24. Вид основного окна программы Research

3.5.7. Система подготовки и просмотра интерактивных технических руководств - Content Editor и Content Browser PPL Drive Suite

Эксплуатационная техническая документация является важнейшим средством эффективного использования ИФЭП 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.

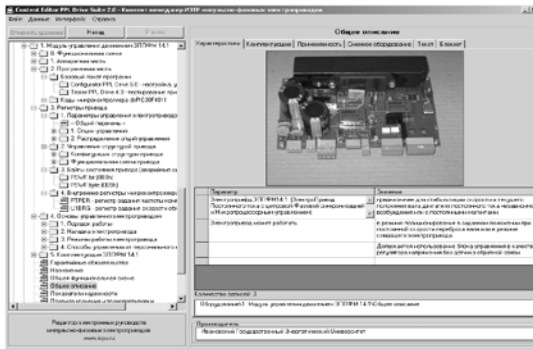


Рис. 25. Вид основного окна программа Content Editor PPL Drive Suite

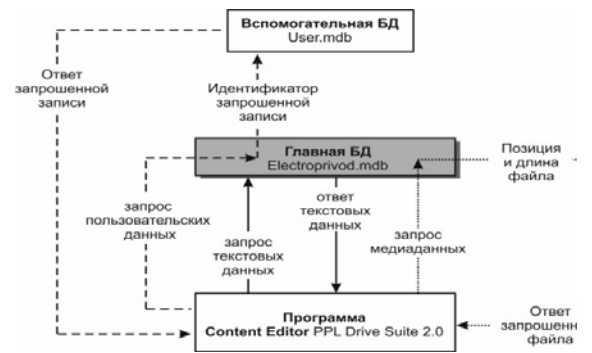


Рис. 26. Схема взаимодействия с программы

взаимодействия с программы редактора с хранилищем данных

Разработанная информационная система PPL Drive Suite позволяет создавать и просматривать иерархически-структурированные ИЭТР. Она состоит из хранилища данных и двух программных модулей для редактирования (Content Editor – рис. 25) и просмотра (Content Browser) руководств. Хранение данных организовано в базе данных MS Access и файл-контейнере (рис. 26). Для защиты данных в руководствах использованы отечественные программно-аппаратные средства на базе микроконтроллера.

Заключение

В ходе работы был создан опытный образец контроллера электропривода (рис. 27). Управление работой электропривода во

всех режимах осуществляется системой управления, построенной на базе специализированного микроконтроллера (МК) семейства "Motor Control" Microchip dsPIC30F4011, которая состоит из базового блока управления с микроконтроллером, узлами управления ключами АИН, гальванически развязанными источниками питания, устройствами ввода/ вывода, контроллерами сетевых интерфейсов связи CAN и RS-232.



Рис. 27. Контроллер электропривода ЦСН на базе микроконтроллера Microchip dsPIC30F4011



Рис. 28. Макетный образец ЦСН

Экспериментальная проверка контроллера электропривода орбитальной оси телескопа на действующем макетном образце ЦСН (рис. 28) 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.

В ходе испытаний проверялись время "переброса" оси R на углы 60°, 2° за ограниченное время, отработка скоростей в диапазонах от 1"/сек до 40 "/сек в течение определенного времени, а также от 300"/сек до 1800 "/сек в заданном диапазоне углов (табл. 3).

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

Таблица 3. 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"/сек в диапазоне углов оси R от 20° до 155	не хуже 40 "/сек	10 "/сек
Отработка скорости 900"/сек	не хуже 40 "/сек	11 "/сек

в диапазоне углов оси R от 20° до 155		
Отработка скорости 1800"/сек в диапазоне углов оси R от 20° до 155°	не хуже 40"/сек	12 "/сек

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

В результате испытаний и опытной эксплуатации нового контролера электропривода ЦСН оказалось возможным *существенно сократить аппаратную часть штатной системы управления*: вместо использования двух двигателей стало возможным применение лишь одного без изменения кинематической схемы; вместо использования 2 шкафов-стоек (высотой по 2 м.) для управления одним двигателем стало возможным применение только одной платы КЭП ЦСН размером 18,5x10,5 см и весом менее 1 кг; вместо времязатратного способа формирования тахограммы движения привода путем перепайки соединений между набором индуктивностей стал возможен программный способ ее формирования лишенный указанных недостатков; вместо использования дополнительных CAN-интерфейсов стало возможным использование встроенного в КЭП ЦСН CAN-контроллера, а также значительно расширить диапазон регулирования скорости (до

100000:1) и уменьшить время "переброса" оси на 2с, что позволило существенно расширить функциональные возможности и повысить производительность ЦСН; улучшены эксплуатационные свойства ЦСН за счет встроенной программно-аппаратной диагностики блоков КЭП ЦСН

По окончании испытаний нового привода в НТЦ-СКБ 4 ОАО "Красногорский завод им. С.А. Зверева" были получены официальные акты об использовании КЭП и программ, акт технической проверки КЭП на соответствие предъявляемым требованиям и получен заказ на разработку более 30 контроллеров управления для автоматизации остальных осей телескопов.

Сведения об авторах

Поклад Павел Михайлович, старший преподаватель кафедры "Технология автоматизированного машиностроения" Ивановского государственного энергетического университета, к.т.н., ИГЭУ, Рабфаковская ул., 34, Иваново, 153003, тел.: (4932) 290-464, 89203621635; e-mail: cdminfo@rambler.ru.