

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОДВИГАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С НЕЖЕСТКОЙ МЕХАНИКОЙ

ГЛАЗУНОВ В.Ф., д-р техн. наук, ЛЕБЕДЕВ С.К., канд. техн. наук, ГНЕЗДОВ Н.Е., асп.

Представлены результаты разработки и исследования основных элементов многодвигательного электропривода переменного тока с нежесткой механикой, направленные на практическую реализацию электроприводов опорно-поворотных устройств антенн, телескопов, кранов и экскаваторов, приводов шаровых мельниц, манипуляторов, тягового привода и т. п.

На протяжении нескольких последних десятилетий наблюдается устойчивый интерес специалистов к электроприводам с нежесткой механикой, что подтверждает важность и актуальность разработки и исследования систем этого класса.

Задачу устранения негативного влияния колебаний в упругих кинематических связях целесообразно решать в процессе синтеза системы управления электроприводом (ЭП).

Известные отечественные научные школы электропривода занимались изучением систем с нежесткой механикой [1, 2, 3]. Однако полученные решения, как правило, лежат в области линейных систем управления электроприводом постоянного тока. На современном уровне развития электропривода и средств управления возникают как новые особенности, не позволяющие в полной мере использовать известные решения, так и новые возможности решения указанной проблемы.

Освоение промышленного производства силовых интеллектуальных модулей (IPM) с набором IGBT-транзисторов и выпуск для управления двигателями специализированных DSP-микроконтроллеров привели к доминированию на рынке относительно дешевых преобразователей частоты для двигателей переменного тока. Такие системы обеспечивают высокое быстродействие и точность, широкую полосу пропускания, а так же, как обязательный элемент, развитые интерфейсные возможности, в том числе встроенные стандартные коммуникационные протоколы.

Современную систему управления многодвигательным электроприводом, имеющую в составе ряд двигателей с преобразователями частоты, следует синтезировать, учитывая электрическую, механическую и организационную взаимосвязанность.

Рассмотрим многодвигательный электропривод с двигателями переменного тока одинаковой мощности, работающими на общую нагрузку, где нежесткие кинематические связи объекта и люфты в передачах оказывают существенное влияние на надежность системы и качество ее работы. К таким объектам относятся опорно-поворотные устройства антенн, телескопов, кранов и экскаваторов и пр., а также шаровые мельницы, манипуляторы и т.п.

Объект управления представляет собой многодвигательный электропривод переменного тока, приводящий в движение общую рабочую машину (РМ, рис. 1). Кинематические связи объекта характеризуются вязкоупругостью, оказывающей существенное влияние на динамику системы.

Важным в таких системах является обеспечение монотонного характера переходных процессов и расширение полосы пропускания при простоте структуры и реализации системы, а также обеспечение взаимодействия электроприводов между собой и с системами управления более высокого уровня.

Нелинейный регулятор состояния переменной структуры сравнивает задание, поступающее по шине Modbus или CANOpen от систем управления верхнего уровня, с информацией о состоянии объекта, получаемой от наблюдателя состояния, и рассчитывает сигнал задания для контура электромагнитного момента. Этот сигнал в системе динамического закрытия зазора (люфта) в механических передачах преобразуется в сигналы задания момента каждого двигателя для закрытия этого зазора во всех режимах работы.

Анализ структур современных систем векторного управления асинхронного электропривода позволил установить, что наличие в системе такого функционального элемента, как блок компенсации перекрестных связей, исключает демпфирование электродвигателем возникающих в системе колебаний. Их демпфирование в системе электропривода постоянного тока обусловлено действием противо-ЭДС двигателя, что исследовано в [4]. В двигателях переменного тока также действует противо-ЭДС, но её действие компенсируется системой векторного управления. Это подчеркивает важность и своевременность постановки задач демпфирования колебаний в многодвигательных электроприводах переменного тока.

Учитывая высокое быстродействие современных электроприводов [5], используя метод декомпозиции в процессе синтеза системы управления, контур электромагнитного момента представили безинерционным динамическим звеном с коэффициентом усиления единица. Экспериментальные исследования, проведенные на электроприводе с преобразователем частоты серии ЭПВ, разработанном в ИГЭУ (НИЛ «Вектор», кафедра ЭП и АПУ), позволили установить, что реакция контура электромагнитного момента на номинальное ступенчатое воздействие позволяет представить его апериодическим звеном с постоянной времени $T=0,0002$ с. Такое представление контура электромагнитного момента использовано при моделировании и исследовании системы.

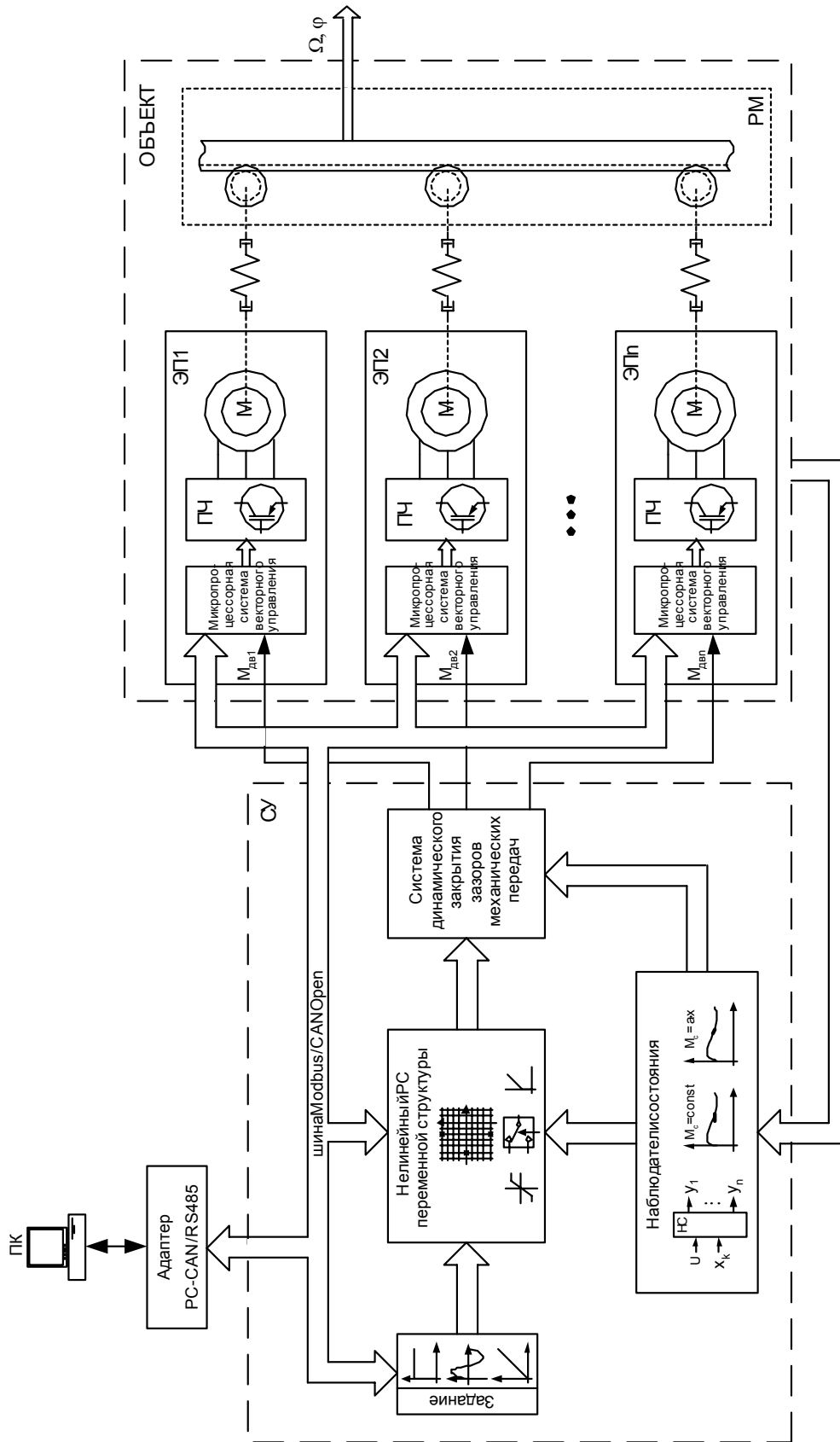


Рис. 1. Функциональная схема многодвигательного электропривода с нежесткой механикой

Структура объекта представлена на рис. 2 в виде 3-х массовой электромеханической системы (ЭМС). При необходимости её можно дополнить числом каналов «двигатель – рабочая машина», определяемым количеством работающих на общую нагрузку электродвигателей.

Возможно несколько вариантов построения системы управления:

- с одним регулятором ведущего электропривода;
- с регулятором для каждого электропривода;
- с одним регулятором ведущего электропривода и локальными регуляторами ведомых электроприводов;
- с одним общим регулятором.

Основываясь на анализе этих структур, проведенном в [3], выбор сделан в пользу структуры с одним общим регулятором. Такая структура не уступает остальным по динамическим и энергетическим показателям и проще структур с несколькими регуляторами.

Благодаря этому стало возможным и целесообразным эквивалентировать 3-х массовую (или многомассовую) ЭМС к 2-х массовой, структура которой традиционна и ясна из структуры наблюдателей состояния (рис. 3).

Сравнительный анализ временных характеристик и линейный анализ двух структур (3-х и 2-х массовой) подтвердили их эквивалентность [6].

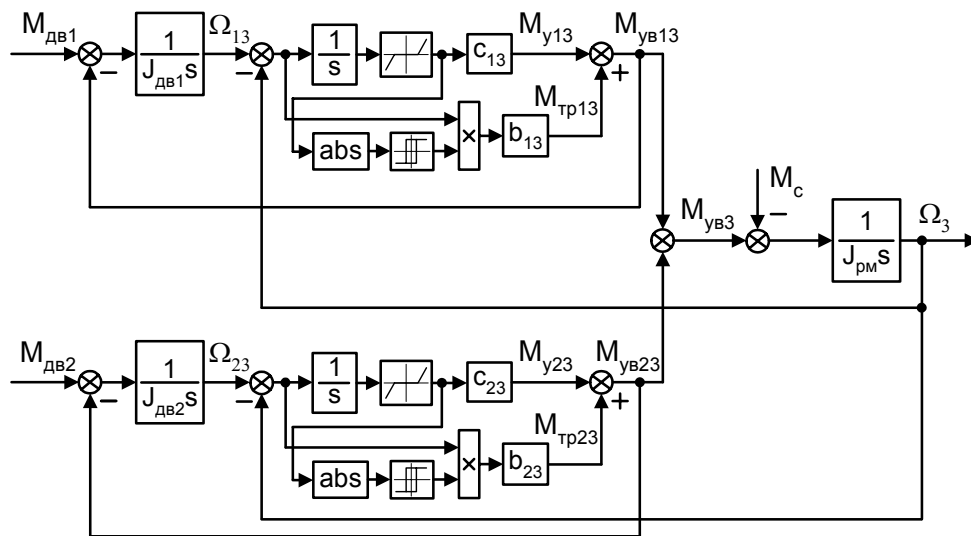


Рис. 2. Структура объекта с нежесткой механикой

Для регулирования скорости рабочей машины предложен нелинейный регулятор состояния переменной структуры, синтез и результаты исследования которого приведены в [6].

Для обеспечения разработанного регулятора информацией о координатах состояния объекта в структуре системы управления использован наблюдатель состояния. Ряд структур наблюдателей, а также их синтез рассмотрены в [7]. Там же приведены результаты исследования наблюдателей состояния, позволяющие судить о необходимости учета нулей передаточных функций, связывающих начальные условия наблюдателя и ошибки восстановления.

Для этого целесообразно после задания параметров наблюдателя в соответствии с биномиальным распределением корней характеристического уравнения уточнить параметры, используя пакет NCD Blockset системы Matlab.

Кроме вычисления координат состояния объекта наблюдатель должен обеспечить фильтрацию дискретных сигналов с датчиков и компенсацию отклонения параметров расчетной модели и реального объекта введением в наблюдатель модели возмущения, отражающей неточность знаний об объекте управления.

Традиционно возмущение полагается постоянным и его оценка в астатическом наблюдателе получается как интеграл невязки. Такая оценка не является точной, поскольку реальное возмущение, действующее на объект, может иметь более сложную форму.

Предложено моделировать возмущение линейной, квадратичной и так далее функцией времени. Наблюдатели состояния с такими моделями возмущения предложено называть наблюдателями состояния с астатизмом соответственно 2-го, 3-го и так далее порядков. На рис. 3 представлены структуры наблюдателей состояния с астатизмом 1-го и 2-го порядков. В первом случае возмущение полагается постоянным, во втором – линейно изменяющимся.

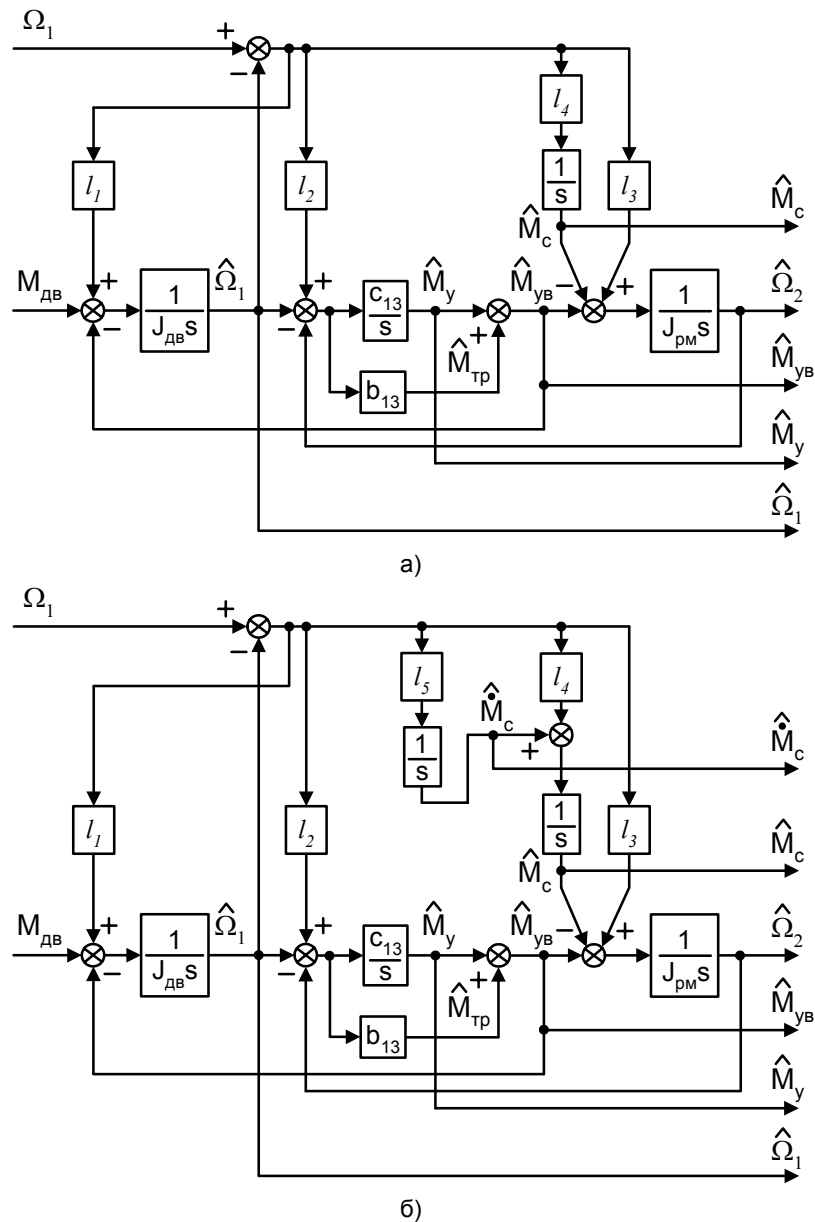


Рис. 3. Астатические наблюдатели состояния: а) наблюдатель состояния с астатизмом первого порядка; б) наблюдатель состояния с астатизмом второго порядка

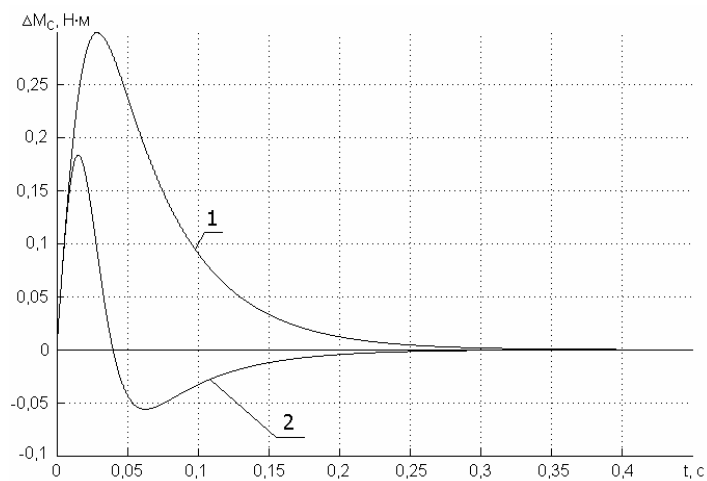


Рис. 4. Изменение разности реального и восстановленного возмущений: 1 – при использовании наблюдателя состояния с астатизмом первого порядка; 2 – при использовании наблюдателя состояния с астатизмом второго порядка

В результате сравнения работы астатических наблюдателей состояния (рис. 4), выполненного на ЭВМ, установлено, что наблюдатель состояния с астатизмом 2-го порядка с меньшей в несколько раз квадратичной интегральной оценкой восстанавливает все переменные объекта, в том числе и возмущение при одинаковом заданном быстродействии.

Наличие в системе управления наблюдателей состояния позволяет создавать системы динамического закрытия зазоров в механических передачах.

Известное решение задачи [1], получившее название электромеханического торсиона, заключается в том, что в системе создается момент распора за счет работы одного двигателя в двигательном, а другого в генераторном режиме работы. Режим распора поддерживается либо постоянно, либо только при реверсе. В первом случае для реализации режима распора суммарная установленная мощность двигателей завышается в 2,2–2,4 раза, а во втором случае, хотя установленная мощность завышается на меньшую величину, выборка зазора осуществляется не во всем диапазоне изменения момента нагрузки. Поэтому в силу своей надежности первый вариант реализации электромеханического торсиона получил наибольшее распространение.

Предлагаемая система динамического закрытия зазоров механических передач обеспечивает как их отсутствие во всех режимах работы, так и энергосбережение в электроприводе. Это достигается тем, что моменты распора для каждого двигателя системы формируются на основе информации о моментах вязко-упругого взаимодействия, действующих в кинематических парах «двигатель – рабочая машина» и определяемых наблюдателями состояния с астатизмом высокого порядка в качестве моментов нагрузки каждого двигателя.

В системе управления многодвигательным электроприводом важно обеспечить взаимодействие локальных электроприводов как между собой, так и с системами управления более высокого уровня. Это позволяет не только координировать работу локальных электроприводов в единой системе управления, но и управлять их работой в соответствии с требованиями технологического процесса предприятия.

Взаимодействие оборудования, в том числе и электроприводов, связано с обменом информацией. В современной технике автоматизации этот обмен стандартизирован и осуществляется на основе общепринятых коммуникационных протоколов Modbus, Profibus, CANOpen, DeviceNet, Interbus и других.

С учетом коммуникационных протоколов и их характеристик, реализованных в преобразователях частоты фирм Siemens, ABB, Vacon, Control Techniques, KEB, Hitachi, предъявленных к разрабатываемой системе управления требований принято решение о реализации в системе управления протоколов Modbus и CANOpen. Аппаратной базой для реализации протоколов выбраны преобразователи частоты (ПЧ) серии ЭПВ, разработанные в НИЛ «Вектор» кафедры ЭП и АГУ (ИГЭУ) и выпускаемые ООО «ЭЛПРИ» ЧЭАЗ.

Разработанный адаптер PC-CAN/RS485 выполняет следующие функции:

- объединяет до 246 устройств в сеть Modbus и до 126 устройств в сеть CANOpen с управлением от персонального компьютера (ПК) или промышленного контроллера (рис. 5);
- осуществляет прием запроса от компьютера или промышленного контроллера;
- определяет сеть адресата запроса (Modbus или CANOpen);
- формирует и передает кадр запроса в соответствующую сеть;
- получает и передает компьютеру или промышленному контроллеру кадр ответа;
- используется для построения многоуровневых сетей;
- обеспечивает обмен данными между сетями Modbus с разным форматом кадра (ASCII, RTU).

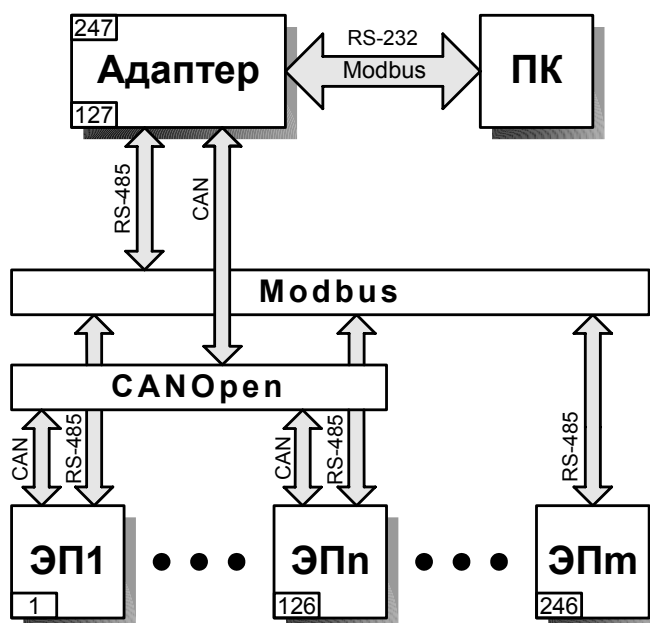


Рис. 5. Схема промышленной сети

На основе перечисленных аппаратных средств создан многофункциональный программно-аппаратный комплекс управления преобразователями частоты серии ЭПВ.

Разработанное и реализованное программное обеспечение для адаптера и преобразователей частоты позволило обеспечить выполнение следующих функций:

- обеспечение связи между компьютером или другим управляющим устройством, имеющим последовательный канал RS-232, и рядом устройств, имеющих канал RS-485, по протоколу Modbus;
- обеспечение связи между компьютером или другим управляющим устройством и рядом устройств по протоколу CANOpen.

При этом технические характеристики реализованных протоколов следующие:

для протокола Modbus:

- физический уровень – последовательный канал стандарта RS232/RS485;
- скорость передачи данных – до 115,2 кБит/с;
- количество устройств в сети – до 246;
- форматы кадра Modbus – ASCII и RTU (адаптер может осуществлять преобразование названных форматов);
- поддержка 11 стандартных функций Modbus;
- максимальное количество считываемых или записываемых параметров (регистров) в одном запросе – 60;

для протокола CANOpen:

- физический уровень – канал стандарта CAN;
- скорость передачи данных – до 1 МБит/с;
- длина линии – до 1 км;
- количество устройств в сети – до 126;
- канальный уровень – протокол CAN 2.0 стандартный вариант;
- поддержка протоколов – SDO (Service Data Object) и PDO (Process Data Object).

Большой словарь объектов ПЧ – список доступных внешним управляющим устройствам параметров – предоставляет возможность точного и гибкого управления им в реальном масштабе времени и получения информации о его состоянии и структуре промышленной сети. Также реализованы развитые диагностические функции протоколов, включая обеспечение возможности получения информации о всех ошибках связи и переданных кодах исключения.

Программное обеспечение комплекса для ПК, программа с рабочим названием VCDrive, представляет собой мультидокументный интерфейс пользователя, реализующий возможность функционирования в двух режимах по отношению к управляемому ПЧ (online/offline).

Программа позволяет выполнять следующие функции:

- просматривать и редактировать параметры и переменные ПЧ с последующей загрузкой изменений в ПЧ (для быстрого доступа к основным узлам ПЧ используются мнемосхемы соответствующих объектов);
- рассчитывать параметры регуляторов и других переменных на основе данных, введенных пользователем;
- организовать мониторинг основных переменных и флагов состояния ПЧ с заданной частотой обновления, в том числе и в графическом виде (режим осциллографа);
- формировать управляющие сигналы ПЧ, в том числе с использованием циклограмм работы и построением внешних контуров регулирования.

Интерфейс программы подразумевает использование трехуровневой политики доступа к элементам управления и настройки объектов управления, обеспечивающей режим разделения ролей «пользователя» и «наладчика».

Таким образом, сравнивая параметры реализованных коммуникационных протоколов с аналогичными функциями новейших серий преобразователей частоты мировых лидеров в этой области (Siemens, ABB, Vacon, Control Techniques, KEB, Hitachi), можно с уверенностью говорить о соответствии реализованных средств коммуникации мировому уровню, а с точки зрения доступных функций и диагностики о их превосходстве.

Полученные результаты разработки и исследования основных элементов многодвигательного электропривода с нежесткой механикой позволяют обеспечить практическую реализацию электроприводов опорно-поворотных устройств антенн, телескопов, кранов и экскаваторов, приводов шаровых мельниц, манипуляторов, а также представляют самостоятельный интерес и могут быть использованы при проектировании широкого класса приводов переменного тока.

Список литературы

- 1. Борцов Ю.А., Соколовский Г.Г.** Автоматизированный электропривод с упругими связями. 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербург. отд-ние, 1992. – 288 с.
- 2. Михайлов О.П.** Динамика электромеханического привода металлорежущих станков. – М.: Машиностроение, 1989. – 224 с.
- 3. Тарарыкин С.В., Тютиков В.В.** Системы координирующего управления взаимосвязанными электроприводами: Учеб. пособие / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2000. – 212 с.
- 4. Филичев В.Т.** Электромеханические системы с упругими связями: Учеб. пособие / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2002. – 132 с.
- 5. Виноградов А.Б., Чистосердов В.Л., Сибирцев А.Н. и др.** Новые серии многофункциональных векторных электроприводов переменного тока с универсальным микроконтроллерным ядром // Привод и управление. – 2002. – № 3. – С. 5–10.
- 6. Система** управления асинхронным электроприводом с нелинейным модальным регулятором переменной структуры / А.Б. Виноградов, В.Ф. Глазунов, Н.Е. Гнездов, С.К. Лебедев // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2005. – № 2. – С. 40–45.
- 7. Анализ** вариантов построения регуляторов и наблюдателей САУ с упругими связями / А.Б. Виноградов, В.Ф. Глазунов, Н.Е. Гнездов, С.К. Лебедев // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2003. – № 5. – С. 87–93.