

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ СЕРИИ ESD-C

В настоящее время преобразователи частоты (ПЧ) для управления трехфазными асинхронными электродвигателями (АД) являются неотъемлемыми элементами автоматизации многих технологических комплексов. У подавляющего большинства производителей ПЧ выполняются по стандартной схеме «неуправляемый выпрямитель – автономный инвертор напряжения». Выпрямитель создается на основе кремниевых полупроводниковых диодов, а автономный инвертор напряжения – на основе биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT-транзисторов). Для реализации тормозных режимов электропривода в ПЧ включаются тормозные резисторы небольшой мощности, управляемые отдельным IGBT-транзистором (для механизмов с большим моментом инерции и активным характером нагрузки предусматривается возможность подключать дополнительный внешний тормозной резистор большей мощности). В целях мониторинга напряжений и токов в фазах электропривода производители включают в ПЧ соответствующие датчики. Система управления ПЧ и в целом электроприводом основывается на быстродействующих сигнальных процессорах (DSP-процессорах).

А. А. Антропов, А. Каракулов, С. Ланграф,
компания ЭлеСи

Новая разработка ЗАО «ЭлеСи» – серия преобразователей частоты мощностью от 2,5 до 110 кВт ESD-C – также выдержана в духе мировых тенденций в области электропривода. Однако, несмотря на аналогичность структуры (см. Рисунок 1), по функциональным возможностям преобразователи ESD-C отличаются от других, которые предлагаются на рынке. В настоящей статье рассматриваются их особенности относительно условий российского рынка промышленной автоматизации.

НАДЕЖНОСТЬ

Основная проблема, возникающая при эксплуатации сложных электронных устройств в России, – нестабильность работы электрических сетей. Есть два пути ее решения: либо обеспечить нормальное функционирование электрической сети, либо установить ПЧ, гарантирующий устойчивую работу при использовании существующей электрической сети. Соответственно, конструкция ПЧ должна обеспечивать стабильную работу электропривода в условиях отклонений напряжения питания. Весь свой обширный опыт применения преобразователей частоты в качестве блоков управления электроприводами запорной арматуры на магистральных нефтепроводах, где напряжение питания на линейной части нефтепровода часто выходит за рамки допустимых по ГОСТу отклонений, компания ЭлеСи применила и при создании ПЧ серии ESD-C. Схемотехнические решения гарантируют устойчивость к отклонениям напряжения сети $380^{+50\%}_{-50\%}$ и к микросекундным импульсам до 2 кВ с соблюдением критерия качества функционирования А по ГОСТ Р 51317.4.11-99.



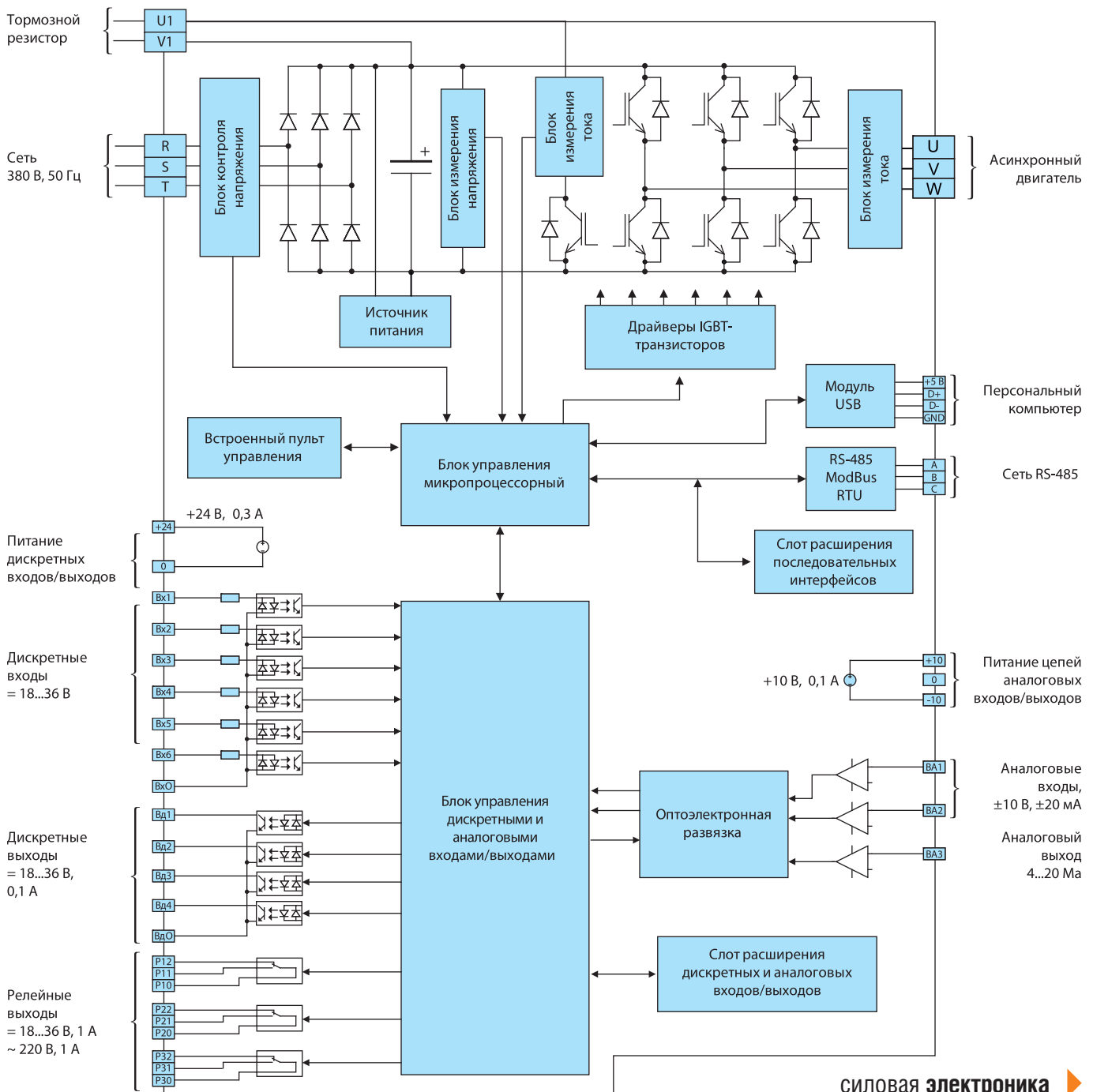
ИНТЕРФЕЙСЫ КОММУНИКАЦИЙ

ПЧ связан с системой управления технологическим комплексом посредством интерфейсов. Несмотря на примитивность, дискретный однобитовый интерфейс все еще широко применяется из-за простоты и низкой стоимости реализации. Одно из отличий от аналогов у ПЧ серии ESD-C – возможность программирования каждого дискретного входа на выполнение любой возможной в ПЧ функции: пользователю необходимо записать в регистр, привязанный к конкретному дискретному входу, адрес требуемого регистра (параметр настройки или управления) и указать заранее заданное значение в случае срабатывания дискретного входа. Аналогично устроен и дискретный

вывод: пользователь указывает регистр, пороговое значение и условие, при котором срабатывает дискретный выход.

Если говорить о цифровых коммуникациях посредством последовательных интерфейсов, то здесь важно предоставить пользователю механизм подключения практически любых интерфейсов, которые присутствуют на его объекте. В ПЧ серии ESD-C стандартно применяются интерфейс USB для локальной настройки через персональный компьютер и интерфейс RS-485 с протоколом Modbus RTU (см. Рисунок 1). Дополнительно существует возможность установить плату расширения коммуникаций, реализованную на основе специализированного коммуникационного кристалла, и, соответственно, получить интерфейсы и протоколы Profibus-DP, Profinet, CAN, Ethernet и другие, которые поддерживаются примененным кристаллом.

Рис. 1. Функциональная схема ПЧ серии ESD-C



◀ Преобразователь частоты серии ESD-C

Здесь также следует отметить, что ПЧ серии ESD-C оснащен графическим индикатором для задания/просмотра параметров, на который возможно выводить осциллограммы токов двигателя, а также других сигналов, присутствующих в данном ПЧ.

Полный набор интерфейсных возможностей в базовом варианте (без плат расширения) показан на Рисунке 1.

ВОЗМОЖНОСТЬ ИНТЕГРАЦИИ В СЛОЖНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ

Большинство технологических комплексов (ТК) содержат несколько исполнительных элементов – двигателей, реле, ламп, электромагнитов, ТЭНов и т. д. Соответственно, система управления ТК должна контролировать каждый из них. Как известно, существуют две концепции построения систем – централизованная и распределенная. Так как ПЧ является интеллектуальным устройством, обладая собственным вычислительным ресурсом, возможно применить распределенную схему управления с целью минимизации стоимости всей системы и повышения надежности функционирования. В подкрепление к этому подходу в ПЧ серии ESD-C присутствует упоминавшийся выше интерфейс дискретных и аналоговых сигналов, которые можно задействовать для управления несколькими исполнительными элементами, в том числе для последовательного управления несколькими двигателями через дополнительные контакторы. Для реализации распределенной схемы ПЧ должен быть оснащен собственным контроллером технологического процесса, который обеспечивает управление системой на основе имеющейся информации и поставленных целей функционирования. В качестве такой возможности в ПЧ серии ESD-C имеется интерпретатор программы пользователя, позволяющий ПЧ обрабатывать заданную логику функционирования для достижения поставленных целей, а также вызывать стандартные процедуры управления – ПИ- и ПИД-регуляторы, задатчики интенсивности и т. д. Если пользователь предусматривает изменение настройки регулятора в зависимости от режимов работы, то это также возможно посредством программы интерпретатора.

В целом становится возможным не только настраивать конфигурацию устройства, изменяя содержимое контрольных регистров, но и задавать требующиеся алгоритмы функционирования, как на стандартном промышленном логическом контроллере (ПЛК). В данном режиме в ходе работы изменяются величины заданий и настроек ПЧ в зависимости от времени, текущих значений координат системы, внешних и внутренних событий (например, таймеров).

Пользовательские программы для ПЧ серии ESD-C создаются на упрощенной версии языка «Си» с помощью стандартного персонального компьютера и дополнительного программного обеспечения. Поддерживаются операторы ветвления, арифметические операции и некоторые другие средства языка «Си». После создания пользовательские программы загружаются в ПЧ через USB-порт. Пользователь обладает доступом к глобальным переменным (состояние кнопок пульта управления, регистры состояния дискретных входов и выходов, регистр задания скорости вращения двигателя и др.); можно считывать их, проводить над ними операции и возвращать их в систему.

Применение встроенного интерпретатора позволяет исключить из АСУ ТП невысокой сложности отдельный ПЛК, возложив все необходимые функции непосредственно на ПЧ.

В пределе возможно построение системы из нескольких

ПЧ, которые одновременно управляют электродвигателями, синхронизируясь между собой согласно логике и правилам, заданным пользователем.

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ РАСШИРЯЕМОСТЬ

Большинство производителей ПЧ предлагают расширение их возможностей в отношении дискретного и аналогового интерфейсов, а также специальных интерфейсов для работы с датчиками (резольверами, датчиками «квадратурных» сигналов, датчиками с SSI-интерфейсами и т. д.). Такой подход позволяет минимизировать стоимость ПЧ, предоставив пользователю возможность самостоятельно выбрать набор дополнительных аппаратных средств для удовлетворения имеющихся потребностей. Аналогичный подход использован и для ПЧ серии ESD-C. Помимо базового интерфейса, о котором говорилось выше, предлагаются две платы расширения:

- для управления несколькими двигателями в приложениях, не требующих обеспечения высоких динамических свойств и одновременного регулирования скорости у всех электродвигателей системы (многодвигательные насосные и вентиляторные установки). Фактически это плата дискретных входов/выходов, необходимая для последовательного запуска нескольких двигателей, подключаемых к ПЧ посредством контакторов. Вкупе с наличием программы интерпретатора пользователя, а также аналоговых и дискретных входов/выходов это позволяет создавать и запускать на базе ПЧ серии ESD-C достаточно сложные алгоритмы, применяемые на станциях управления насосами или вентиляторами;

- для управления в приложениях, где необходимо обеспечивать перемещение рабочего органа (так называемые сервосистемы). Фактически это плата с интерфейсом для наиболее распространенных датчиков положения, ориентированная на использование в области управления сервоприводами. Для полноценного применения в системах сервоприводов в ПЧ серии ESD-C предусмотрены режимы работы с синхронным двигателем, а отсюда один шаг до управления роботами и технологическими линиями с точными перемещениями.

ПРЕДСКАЗУЕМОСТЬ РАБОТЫ

Так как ПЧ, в отличие от многих других элементов автоматизации (пускателей, кнопок, датчиков и т. д.), является устройством интеллектуальным, обеспечивающим различную реакцию в различных режимах работы, пользователю необходимо быть уверенным в правильности этой реакции. Один из самых простых способов выявить ее – имитировать возможные воздействия. Однако на реальном объекте это практически невозможно, особенно в отношении аварийных ситуаций. Выходом может быть следующее: предоставить пользователю компьютерную модель ПЧ и возможность компьютерного моделирования технологического комплекса. С помощью такой модели можно проверить правильность спроектированной схемы включения ПЧ в отношении управляющих сигналов, правильность настройки параметров и работы программы пользователя для встроенного в ПЧ технологического контроллера (ПЛК), оценить работоспособность системы в целом, а также изучить, «сидя на диване», особенности работы устройства. Большинство производителей ограничиваются системой моделирования, в которой ПЧ представлен в виде реле (двигатель включен/выключен) или (это относится в основном к сервоприводам) передаточной

функцией электропривода. Соответственно, не предлагается ни полной модели ПЧ, в которой учитываются все особенности алгоритмов работы (защитных функций, коммуникаций, восстановления координат и т. д.), ни возможности оценить работу в составе специфического технологического комплекса. Системы глобального моделирования (Matlab-Simulink и др.) непригодны для этой цели, так как в них нет ключевого компонента – полной модели ПЧ, а моделирование работы только силовой части недостаточно. Компания ЭлеСи предлагает в качестве такой среды программный продукт DriveCAD, который содержит необходимый набор компонентов для моделирования работы технологического комплекса (электродвигателей, пускателей, реле, контакторов), в том числе компонент для моделирования функционирования ПЧ, содержащий реальный управляющий код и отражающий большинство схемотехнических решений ПЧ. Кроме того, возможно самостоятельное создание компонентов пользователем. В результате потребитель предварительно ознакомляется с работой устройства без его покупки, оценивает возможности его применения в своем технологическом комплексе, создав модель в среде DriveCAD. При этом учитываются все тонкости и особенности управляющего программного обеспечения устройства – вплоть до задержек в цифровых коммуникациях между компонентами системы. Если потребитель полностью удовлетворен работой модели, после покупки реального ПЧ он может провести предварительное проектирование с интеграцией ПЧ серии ESD-C в свой технологический комплекс, с проверкой правильности спроектированной схемы подключения и корректности параметров настройки и разработанной программы для встроенного ПЛК. Наконец, пользователь может смоделировать работу ПЧ в различных нестандартных ситуациях, которые могут сложиться в системе.

УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ

Так как ПЧ изначально был элементом электропривода, для него необходимо обеспечивать «классические» характеристики электропривода – быстродействие, точность, КПД, диапазон регулирования. Сюда же можно отнести и все функции защиты электропривода.

Структурная схема ПЧ серии ESD-C предполагает четыре варианта программной реализации, в основу которых положены различные принципы управления АД.

В первом варианте реализуется скалярное частотное управление АД в системе без обратной связи (ОС) по частоте вращения (см. Рисунок 2). Для улучшения рабочих характеристик в системе без ОС по скорости используются компенсации скольжения и момента.

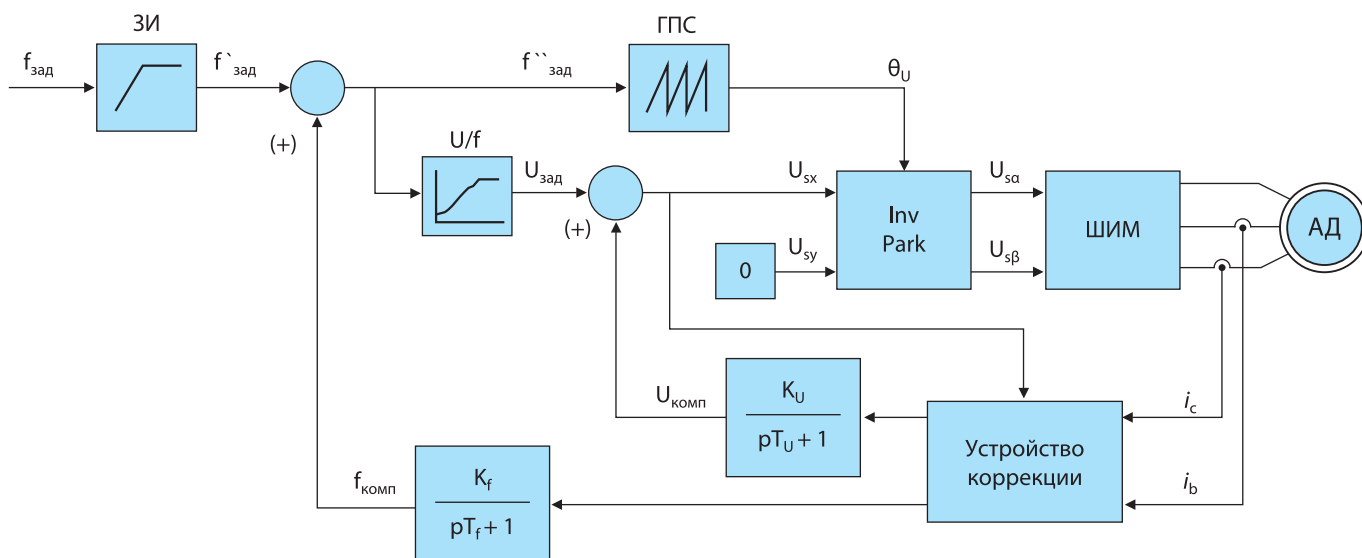
Сигнал, задающий частоту вращения ротора, подается на вход задатчика интенсивности (ЗИ), который обеспечивает разгон с постоянным ускорением. Далее сигнал складывается со значением частоты компенсации скольжения и поступает к генератору пилообразного сигнала (ГПС) и на формирователь напряжения (U/f). На выходе блока U/f формируется значение напряжения в соответствии с принятым законом скалярного частотного управления. Для ориентации вектора напряжения используется модуль обратного координатного преобразования Парка – Горева (Inv Park), на вход которого поступает требуемая амплитуда напряжения с учетом значения компенсации момента и пилообразный сигнал, соответствующий угловому положению вектора напряжения. Полученные таким образом составляющие вектора напряжения, представленные в неподвижных двухфазных координатах, определяют систему напряжений, формируемых на выходе инвертора с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). Устройство коррекции служит для улучшения рабочих характеристик привода и используется для организации обратных связей компенсации скольжения и момента.

Второй вариант предполагает систему скалярного частотного управления АД с ОС по скорости. Из структурной схемы, представленной на Рисунок 2, исключается положительная ОС для компенсации скольжения, вместо чего добавляется контур управления скоростной ошибкой с пропорционально-интегральным регулятором (ПИ) и устройством адаптации параметров. В случае работы в данном режиме обязательна установка импульсного датчика (ИД) на валу АД. Использование в этом варианте компенсирующей ОС по моменту позволяет улучшить качество нагрузочных и энергетических характеристик электропривода.

Третий вариант предполагает работу в режиме векторного управления АД с ОС по скорости (см. Рисунок 3). Данная структурная схема базируется на принципах ориентации системы координат по вектору потока сцепления ротора, что обеспечивает раздельное управление моментом и магнитным состоянием АД.

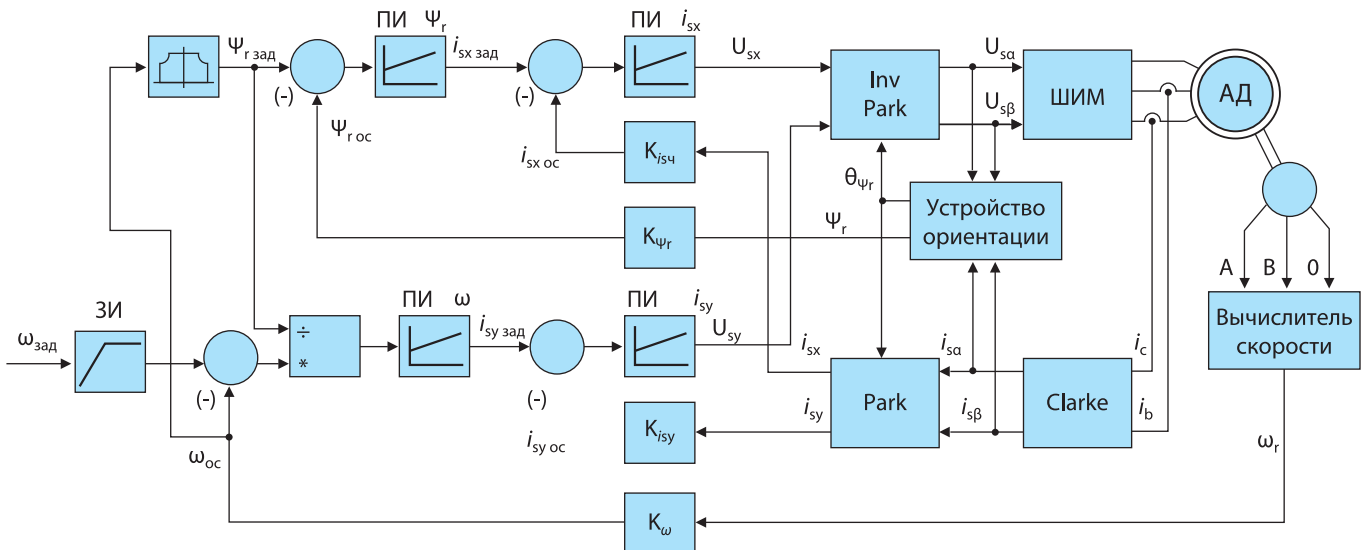
Рис. 2. Структурная схема системы скалярного частотного управления

силовая электроника ▶



Преобразователь частоты серии ESD-C

Рис. 3. Структурная схема системы векторного управления



К особенностям организации данного варианта структурной схемы относится наличие четырех контуров управления для регулирования скорости, потокосцепления ротора и составляющих вектора тока статора. Оптимальная настройка системы выполняется на основе метода подчиненного регулирования в соответствии с желаемым быстродействием электропривода. Информация об ориентации системы координат получается с помощью адаптивного устройства оценки на базе системы математических дифференциальных уравнений, описывающих состояние АД в режиме реального времени. Данный вариант обеспечивает качественное управление моментом АД в динамике, а также возможность регулирования скорости выше номинальной. Обязательным условием для его реализации является наличие импульсного датчика на валу АД, разрешающая способность которого в конечном счете определяет максимальную точность и диапазон регулирования частоты вращения.

Четвертый вариант представляет собой самую сложную структуру управления – векторное управление АД без обратной связи по скорости. Реализация данного способа базируется на принципах третьего варианта (см. Рисунок 3) с учетом добавления модуля для вычисления текущей скорости АД и исключением импульсного датчика. Для повышения качества регулирования в различных диапазонах частоты вращения в данном варианте применяется изменяемая структура системы управления с непрерывной адаптацией параметров.

Для обеспечения качественной работы электропривода необходима достоверная информация о текущих параметрах АД. Особенно это относится к третьему и четвертому вариантам организации управления. ПЧ серии ESD-C настраивают под конкретный АД после монтажа электропривода, перед первым включением. Для этого служит специальный режим автонстройки на основе исследований тестовых включений АД в различных режимах. В дальнейшем при работе АД блок подстройки коэффициентов позволяет отслеживать текущие изменения параметров и выполнять необходимые корректировки в алгоритме управления.

Для изучения возможностей разработанного ПЧ и проверки того, соответствуют ли реальные показатели качества рабо-

ты ожидаемым, выполнены экспериментальные исследования асинхронного электропривода на базе разработанного ПЧ. Они проводились на нагрузочном стенде с датчиком момента и механическим тормозом. В ходе экспериментов использовался макетный образец ПЧ общепромышленной серии и АД модели АИМ А100 L4 мощностью 4 кВт.

Так как структура векторного управления АД без обратной связи по скорости наиболее сложна, далее рассматривается работа системы именно в этом режиме. На Рисунок 4 (а) представлены графики переходного процесса при реверсе с заданием на скорость 1 500 об/мин. Кривые изменения скорости и момента на валу АД показаны в относительных единицах. Ограничение момента установлено на уровне номинального значения, и переходный процесс при заданном ограничении завершается с максимальным быстродействием.

На Рисунок 4 (б) показаны кривые переходного процесса при реверсе с заданием на скорость 75 об/мин. Графики скорости и момента, как и в предыдущем случае, изменяются по оптимальному закону.

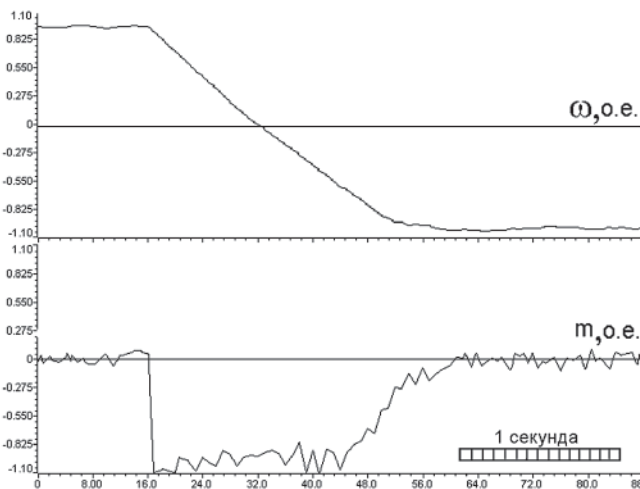
В соответствии с программой исследований выполнены последовательный наброс и сброс момента нагрузки на валу АД. Рисунок 4 (в) иллюстрирует поведение системы при скорости 1 500 об/мин. Наблюдается стабилизация скорости и высокое быстродействие при отработке приложенного возмущающего воздействия.

Рисунок 4 (г) подтверждает вышесказанное для случая работы на нижнем диапазоне регулирования скорости. В сравнении с Рисунок 4 (в) наблюдается увеличение динамического провала по скорости и замедление реакции системы на возмущение. Однако, наравне с указанными факторами, присутствует стабилизация скорости.

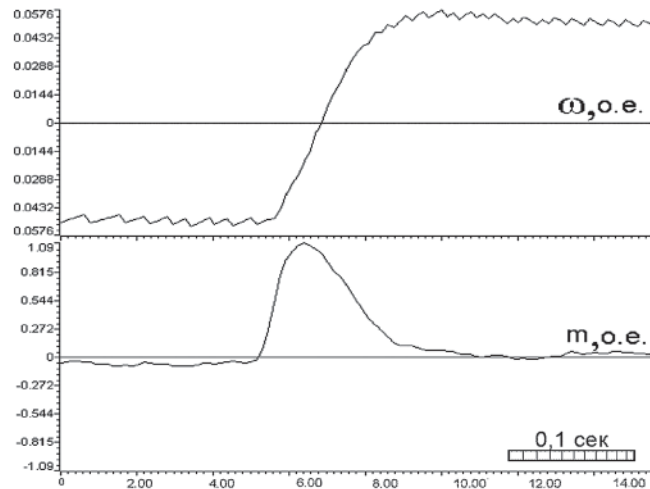
В заключение можно сделать следующие выводы:

- разработанные компанией ЭлеСи ПЧ серии ESD-C обладают гибкой структурой и легко настраиваются в соответствии с особенностями механизма и требованиями технологического процесса;

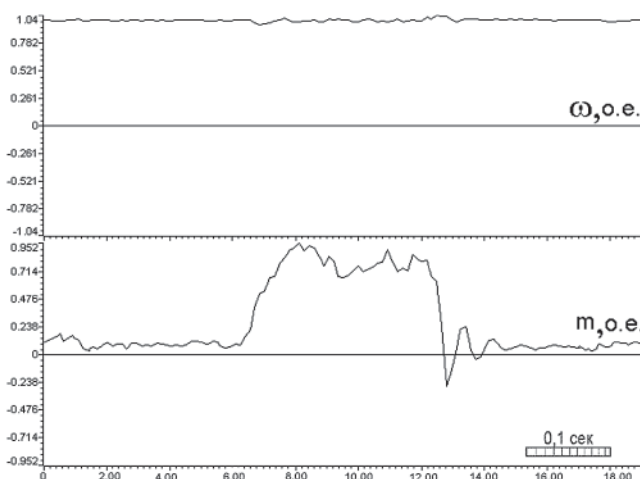
- коммуникационные возможности обеспечивают интеграцию ПЧ с существующими и новыми системами автоматизации,



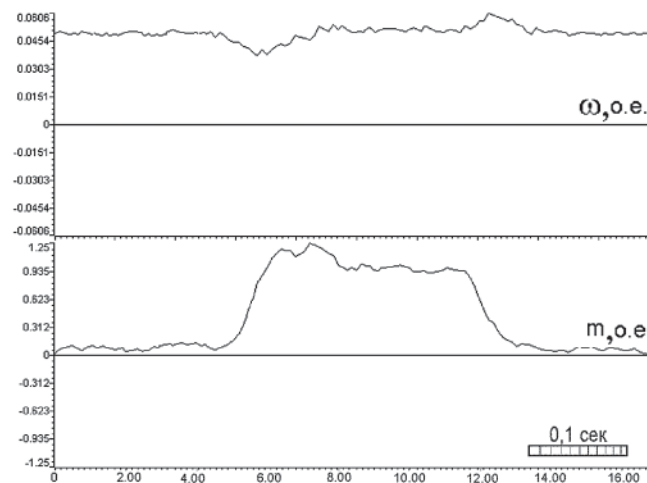
а



б



в



г

Рис. 4. Графики переходных процессов:
а – при реверсе с заданием на скорость 1 500 об/мин;
б – при реверсе с заданием на скорость 75 об/мин;
в – при набросе и сбросе момента нагрузки при скорости 1 500 об/мин;
г – при набросе и сбросе момента нагрузки при скорости 75 об/мин

- созданный алгоритм идентификации позволяет оценить значения параметров АД при начальной настройке и отслеживает их изменения при дальнейшей работе;
- электроприводы на базе разработанных ПЧ по показателям функционирования не уступают ведущим зарубежным аналогам и могут с успехом использоваться в системах промышленной автоматизации.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Антропов А. А.** Серия преобразователей частоты компании ЭЛЕСИ для общепромышленного применения / А. А. Антропов, А. Г. Гарганеев, А. С. Каракулов, С. В. Ланграф, М. А. Нечаев. // Сборник трудов конференции ЭППТ-2005, УГТУ-УПИ. – 2005 г. – С. 85-88.
- 2. Гарганеев А. Г.** Опыт разработки преобразователя частоты для асинхронного электропривода общепромышленного применения / А. Г. Гарганеев, А. С. Каракулов, С. В. Ланграф, М. А. Нечаев // Электротехника. – 2005 г. – № 9. – С. 23–26