

## АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ С АСИНХРОНИЗИРОВАННЫМ ВЕНТИЛЬНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

Г.М. Тутаев, А.Н. Ломакин

Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева,  
Тел. (834-2) 29-06-23. E-mail: [tutaevgm@mail.ru](mailto:tutaevgm@mail.ru)

**Аннотация.** В статье рассматриваются варианты аппаратной реализации системы векторного управления электроприводом на основе асинхронизированного вентильного двигателя с использованием современной элементной базы. Дан анализ современных контроллеров для систем электропривода и предлагается вариант отладки разработанных алгоритмов для имитационной *Simulink*-модели электрической машины, связанной через плату аналогового и дискретного ввода/вывода с отлаживаемым контроллером.

**Ключевые понятия:** автоматизированный электропривод, асинхронизированный вентильный двигатель, векторное управление, контроллер *DSP*.

### Постановка задачи

Интенсивный путь внедрения современных технологий во всех сферах производства требует повышения технических характеристик создаваемых устройств, а так же модернизации уже существующих. Объемный парк использующихся электрических двигателей на базе синхронных и асинхронных машин в качестве нерегулируемого привода нуждается в улучшении по технико-экономическим показателям. Главным направлением здесь является внедрение частотно-регулируемого электропривода (*ЭП*).

За последние десятилетия произошли качественные изменения в структуре электропривода, связанные в первую очередь с переходом на новую элементную базу построения силового канала (высокочастотные *IGBT*-транзисторы, интеллектуальные силовые модули *IPM*) и новую элементную базу канала управления – высокопроизводительные микроконтроллерные системы прямого цифрового управления оборудованием. Помимо непосредственного управления ключами силовых преобразователей, осуществляется прямое сопряжение с широкой номенклатурой датчиков обратных связей (положения, скорости, потока), а также с элементами дискретной автоматики (релейно-контакторной аппаратурой, дискретными датчиками и дискретными исполнительными устройствами). Все это дает возможность отечественным специалистам эффективно решать актуальные задачи создания надежных регулируемых приводов, с использованием самых совершенных алгоритмов, комплексно решая вопросы диагностики работы силовой части и устройств управления, организации удобного интерфейса оператора и т. д.

Результаты исследования электромеханических процессов в ЭП с асинхронизированным вентильным двигателем (АВД) при векторном (ортогональном) управлении на имитационной *Simulink*-модели показали эффективность разработанных законов управления<sup>1,2,3</sup>. Следующим этапом является разработка макетного образца машинно-вентильного каскада, построенного на базе современной элементной базы. Данная задача весьма сложна и требует труда целой группы специалистов в различных областях знаний.

### Метод решения

Автоматизированный ЭП включает в себя, помимо базового двигателя, элементы силовой части и микропроцессорную систему управления. В общем случае компонентами силовой части регулируемого привода являются: управляемый или неуправляемый выпрямитель, сглаживающее звено постоянного тока, инвертор напряжения или тока, обеспечивающий работу асинхронного или синхронного электродвигателя с переменной скоростью.

На рис. 1 изображена функциональная схема ЭП с АВД, которая состоит из трех законченных блоков: силовой части статора (СЧС), силовой части ротора (СЧР) и автономной микропроцессорной системы управления (МСУ).

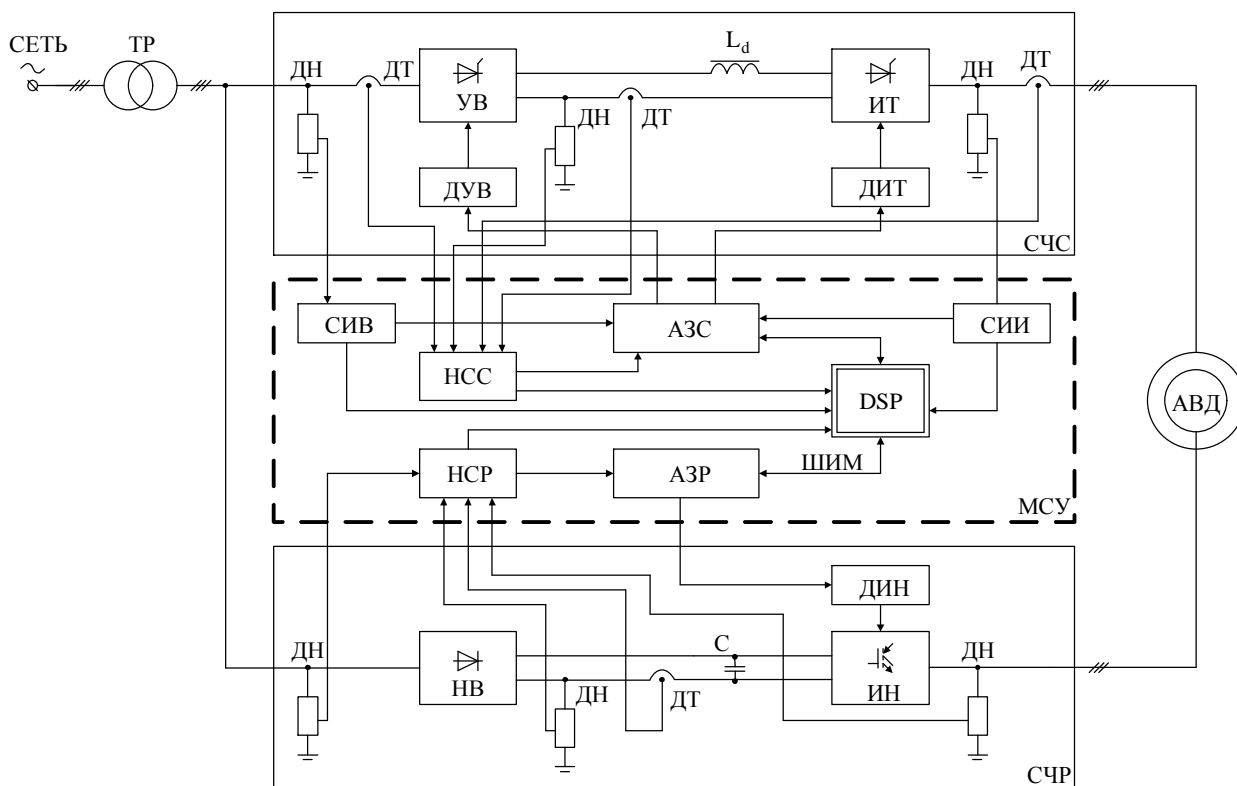


Рис.1. Функциональная схема ЭП с АВД при ВУ

Питание каскада осуществляется от сети переменного трехфазного напряжения посредством согласующего трансформатора (повышающего или понижающего) ТР.

*СЧС* включает в себя тиристорный 6-пульсный *УВ*, который посредством звена высокой индуктивности  $L_{cb}$  соединен с 12-пульсным зависимым *ИТ* с коммутирующими конденсаторами. Система управления генерирует, в соответствии с логикой работы программы, сигналы открытия силовых приборов *УВ* и *ИТ*, которые с помощью усилителей-драйверов *ДУВ* и *ДИТ* формируют импульсы управления тиристорами. *СЧР* состоит из мостового диодного неуправляемого выпрямителя (*НВ*) и транзисторного (*IGBT*) 6-пульсного *АИН* с драйвером управления *ДИН*. Сигналы обратной связи из *СЧС* и *СЧР* в *МСУ* поступают от высоковольтных резистивных делителей напряжения (*ДН*) и трансформаторов тока (*ДТ*) всех трех фаз на входе и выходе, а также звеньев постоянного тока.

Управление силовыми ключами посредством драйверов осуществляет *МСУ* на основании сигналов обратных связей с датчиков напряжения и тока. Главным элементом *МСУ* является блок цифровой обработки сигналов *ЦОС* (*DSP*). Сопряжение управляющих сигналов *ЦОС* с силовой частью и другими элементами электропривода выполняется в соответствующих блоках нормирования сигналов статора (*НСС*) и ротора (*НСР*), которые выполняют функции согласования вида, уровня, гальванического разделения и т.д. Типовые комплекты модулей содержат:

- платы нормализации уровня входных аналоговых сигналов, поступающих от делителей напряжения и трансформаторов постоянного и переменного тока;

- устройство гальванического разделения входных сигналов задания и выходных сигналов измерения;

- модули гальванического разделения входных дискретных сигналов рассчитанных на входное напряжение 24 и 220 В постоянного тока;

- модули транзисторных ключей с опторазвязками, используемые для сопряжения с сильноточными ключами формирователей управляющих импульсов включения тиристоров;

- модули транзисторных ключей для управления сигнальными и промежуточными реле, при этом последние используются для коммутации соленоидов включения и отключения высоковольтных выключателей на входе и выходе *ПЧ*.

Разделение модулей сопряжения по функциям позволяет обеспечить помехоустойчивость устройства управления за счет разнесения высоковольтных и сильноточных цепей, а также уменьшить габариты используемых в этих схемах элементов, например конденсаторов.

*НСС* и *НСР* также формируют сигналы на блоки аппаратной защиты силовых цепей статора (*АЗС*) и ротора (*АЗР*). Сигналы аварий поступают на быстродействующую программируемую логическую микросхему, которая выполняет независимый алгоритм отключения элементов, либо всего *ЭП*.

Синхронизация раздачи импульсов управления *УВ* (с сетью) и *ИТ* (с наводимой *ЭДС* в статоре), осуществляется с помощью *СИВ* и *СИИ* соответственно. Аппаратный компаратор преобразует синусоидальный сигнал

на входе в пропорциональный прямоугольный сигнал той же частоты на выходе. Здесь же осуществляется контроль симметрии трехфазных напряжений, которая учитывается при выдаче импульсов управления, а также защитное отключение.

Построение сложных систем управления в условиях лаборатории стало возможным благодаря высокопроизводительным и недорогим микропроцессорам цифровой обработки сигналов. Текущее развитие ЦОС для целей управления идет по следующим направлениям<sup>4</sup>:

1. Повышение тактовой частоты и производительности центрального процессора (до 100-400 млн.оп./с), расширения числа функций системы управления, реализуемых исключительно программным путем.

2. Переход от традиционной Фон-Неймановской архитектуры центрального процессора к более производительной многошинной конвейерной архитектуре, в частности, модифицированной Гарвардской, переход от обычных микроконтроллеров к сигнальным микроконтроллерам.

3. Увеличение объема встроенной памяти на кристалле: программ (до 128 Кслов) и данных (до 18 и более Кслов).

4. Оптимизация трансляторов с языков высокого уровня по объему кода и быстродействию; отказ от трудоемкого программирования на Ассемблере и перехода к разработке и отладке программного обеспечения непосредственного на языке высокого уровня C/C++ в интегрированных компьютерных средах.

5. Разработка микроконтроллеров с поддержкой большинства стандартных интерфейсов и широким набором специализированных периферийных устройств, адаптированных к задачам управления в области преимущественного применения.

Контроллер *DSP* содержит микропроцессор, систему ввода/вывода дискретных и аналоговых (*АЦП*, *ЦАП*) сигналов, интерфейсы коммуникаций (последовательные/параллельные), модули встроенной и расширяемой памяти, а также интерфейс для программирования и отладки в реальном времени. Разработка собственного контроллера *DSP* для управления *АВД* требует определенного опыта и знаний в области проектирования цифровых схем. Предпочтительным является использование готового программно-аппаратного микропроцессорного комплекта с набором заводских модулей расширения функций.

Возможны варианты построения *DSP* на базе одного из специализированных микропроцессоров серии *Motor Control* (*TMS320C(F)240(280)*, фирма *Texas Instruments*), либо универсальных (*TMS320C30(50, 60)*, автономные контроллеры серии *Tornado E31/33*). В специализированных *DSP* аппаратно, на кристалле микропроцессора, реализованы функции прямого цифрового управления силовыми ключами в режиме *ШИМ*, и сопряжения с датчиками электрических и механических координат привода. В свою очередь универсальные комплекты *DSP* производительнее, имеют больший спектр модулей расширения и развитую архитектуру.

Микропроцессоры серии *Motor Control* функции прямого цифрового управления реализуются за счет использования специализированных периферийных устройств, интегрированных непосредственно на кристалл микроконтроллера и не требующих дополнительных развитых средств сопряжения, а также за счет высокопроизводительной архитектуры и системы команд центрального процессора, позволяющей решать большинство типовых задач управления двигателями программным способом (регуляторы, наблюдатели, преобразователи координат и т.п.).

Самый широкий спектр сигнальных микроконтроллеров для управления двигателями предлагает фирма *Texas Instruments (TI)* – семейство *TMS320C2000*. *DSP*-микроконтроллеры *TI* отличаются улучшенной периферией:

1. один или два менеджера событий со встроенной поддержкой широтно-импульсной модуляции базовых векторов для прямого цифрового управление приводами по структуре «Активный выпрямитель – Инвертор – Двигатель»;
2. встроенный контроллер локальной *CAN*-сети для поддержки распределенного управления;
3. многоканальное быстродействующее АЦП с режимами автовыборки данных сразу по нескольким каналам для систем векторного управления;
4. полный спектр быстродействующих интерфейсных устройств для межмодульных соединений и подключения к системам управления верхнего уровня.

Микроконтроллеры *TI* имеют производительную модифицированную Гарвардскую архитектуру центрального процессора с конвейерной обработкой команд и выполнением любой команды за один такт. Архитектура процессора представлена на блок-диаграмме рис. 2.

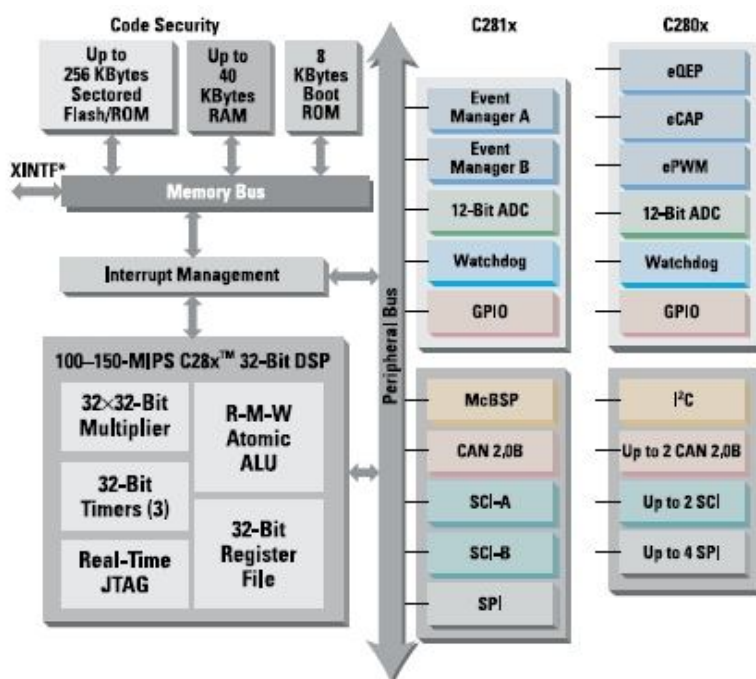


Рис. 2. Блок-диаграмма процессора *TMS320C28x*

Последние представители семейства – микроконтроллеры ‘С28, объединяют в себе достоинства всех трех процессорных архитектур: обычных микроконтроллеров, *DSP*-микропроцессоров и *RISC*-процессоров. Они имеют встроенную библиотеку трансцендентных функций, допускают разработку непосредственно на языке высокого уровня *СИ* в реальном времени.

На отечественном рынке разработки специализированных контроллеров для систем управления *ЭП* на базе микропроцессоров серии *Motor Control* занимается кафедра автоматизированного электропривода *МЭИ* (г. Москва) по кооперации с *НПФ «Вектор»*, «Цикл+», *ЭЗАН*, *ИБП РАН* и др. Ими разработана серия универсальных модульных цифровых систем управления для современных электроприводов с исполнительными двигателями различных типов: от асинхронных до многофазных вентильно-индукторных, а также для преобразователей частоты «*Универсал*»<sup>5</sup>. В состав разработанной серии входят:

**Модуль контроллера привода (МК)** – выполняет функции прямого цифрового управления элементами силового канала и сопряжения с датчиками. На рис. 3. представлена архитектура универсального контроллера *ЭП*.

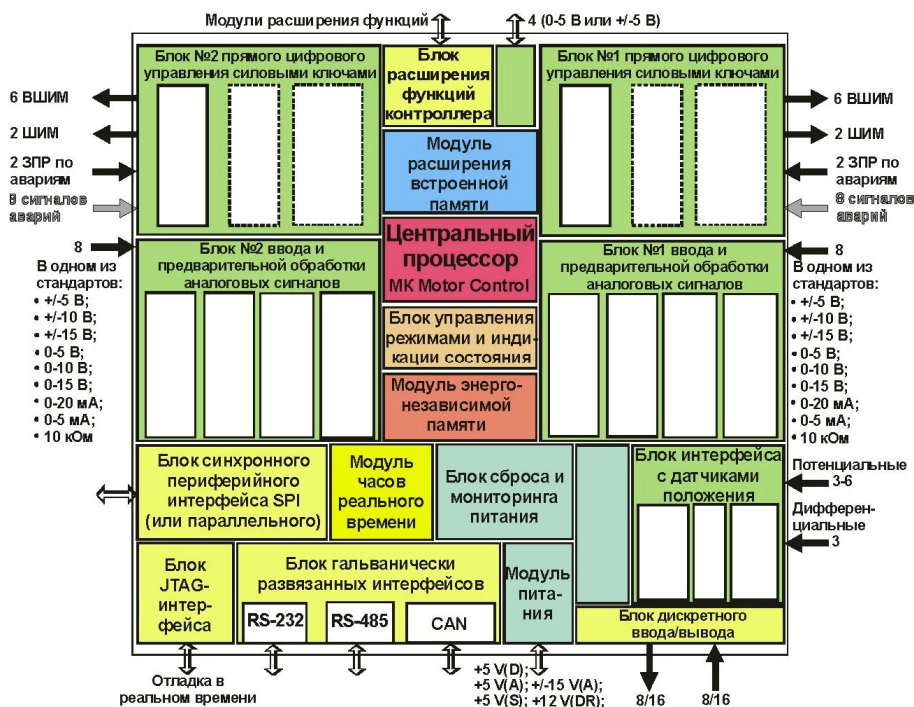


Рис. 3. Архитектура универсального контроллера *ЭП МК*

Для повышения модульности и удешевления системы управления может конструктивно разбиваться на плату базового контроллера и одну или несколько плат расширения функций базового контроллера. Вся серия контроллеров привода имеет единую архитектуру и отличается производительностью центрального процессора и объемом памяти.

**Модуль расширения функций базового контроллера (MP)** – позволяет в зависимости от типа привода и специфики его применения расширить функции базового контроллера, например, обеспечить: управление сразу двумя инверторами, сопряжение с двумя датчиками положения, расширить память,

сетевые или загрузочные возможности контроллера.

**Модуль ввода/вывода (МВВ)** – обеспечивает сопряжение системы управления приводом с другими системами: промышленными программируемыми контроллерами, датчиками, технологическим оборудованием.

**Пульт оперативного управления (ПУ)** с дисплеем и клавиатурой обеспечивает интерфейс привода с человеком оператором. Разработаны несколько типов ПУ с различными дисплеями, вплоть до графического, и специализированными клавиатурами.

Одним из последних был разработан высокопроизводительный контроллер *MK17.1* на базе сигнального процессора *TMS320F2810* с производительностью 150 млн.оп./с., ориентированный на сложные системы векторного управления, в том числе бездатчикового управления электроприводами.

Другим возможным вариантом построения цифровой системы управления является использование универсального контроллера *DSP*. Данный сегмент на отечественном рынке представлен совместными разработками российских компаний «Радиосервис» (г. Москва) и «МикроЛАБ Системс» (г. Москва), которые успешно сотрудничают в области разработки конечных изделий с применением технологии *ЦОС*, получившей название *TORNADO*. Особенностью *TORNADO* является его модульность, при которой вычислительные функции, функции ввода-вывода сигналов и эмуляционные функции четко разделены между отдельными совместимыми между собой элементами.

Основными элементами *TORNADO*, реализующими функции цифровой обработки сигналов, являются системы *ЦОС* и автономные контроллеры, построенные на базе процессоров *TMS320*. Системы *TORNADO* предназначены для построения различных систем, в том числе и систем управления *ЭП*, одно- и мультипроцессорных комплексов *ЦОС* на базе *ПК* и промышленных компьютеров<sup>6</sup>, а автономные контроллеры *TORNADO-E* используются для построения автономной аппаратуры с функциями *ЦОС*<sup>7</sup>.

На платах систем *TORNADO* и автономных контроллеров имеются процессор *ЦОС*, память, интерфейс связи с управляющим компьютером (коммуникационные интерфейсы для автономных контроллеров) и разъемы интерфейсов расширения ввода/вывода. Средства ввода/вывода аналоговых и цифровых сигналов, сопроцессоры *ЦОС* для мультипроцессорного расширения и средства скан-эмуляции процессоров *TMS320* конструктивно выполнены в виде дочерних модулей, которые устанавливаются на разъемы интерфейсов расширения на платах систем *TORNADO* и автономных контроллеров.

Следует отметить, что системы *ЦОС TORNADO* обладают уникальной возможностью скан-эмуляции не только собственных процессоров *ЦОС*, но и процессоров *TMS320* внешней аппаратуры. Эта возможность отсутствует в аналогичной продукции других производителей. В системах *TORNADO* она реализуется с помощью дочернего универсального эмуляционного модуля *UECM*, который устанавливается на специальный разъем на платах *TORNADO*.

Система *TORNADO-31* построена на базе 32-разрядного процессора ЦОС с плавающей запятой *TMS320C31* производительностью 60 MFLOPS. Элементами системы *TORNADO-31* являются: процессор ЦОС, блок статического ОЗУ (*SRAM*), интерфейс параллельного расширения ввода/вывода (*PIOX*), интерфейс последовательного расширения ввода/вывода (*SIOX*), интерфейс *ISA*-шины управляющего компьютера (рис. 4).

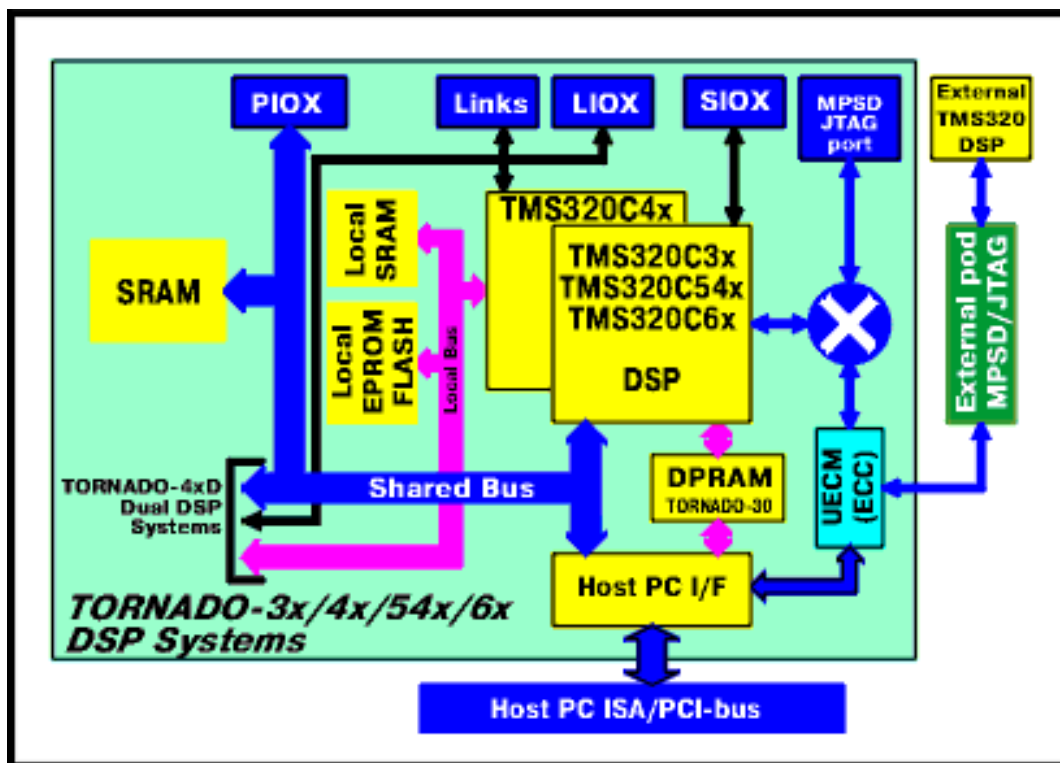


Рис. 4. Архитектура контроллера ЦОС, встраиваемого в ПК

Процессор ЦОС, блок ОЗУ, интерфейс *PIOX* и интерфейс *ISA*-шины объединены общей шиной с разделением доступа (*SB*-шина). Данная архитектура обеспечивает параллельность вычислений в процессоре *TMS320C31* и высокоскоростного обмена данными между *ISA*-шиной ПК и блоком статического ОЗУ или *PIOX*-интерфейсом *TORNADO-31*. Доступ к *SB*-шине от интерфейса памяти *ISA*-шины осуществляется с помощью коммуникационной страницы памяти, которая одновременно отображается в адресное пространство *SB*-шины и пространство адресов *UMB ISA*-шины ПК.

Обмен данными между *ISA*-шиной ПК и *SB*-шиной *TORNADO-31* производится без участия процессора ЦОС, не снижает его производительности и может осуществляться в режимах произвольного программного доступа и блочной передачи данных под управлением контроллера прямого доступа в память ПК.

Выбор структуры для системы управления ЭП на базе *PCI/ISA*-контроллера ЦОС, либо автономного, определяется задачами реализации конкретного схемотехнического решения. Использование *PCI/ISA*-контроллера потребует дополнительной программной реализации обмена данными между ЦОС и центральным процессором ПК, а также приведет к увеличению



массогабаритных показателей системы управления. Данное обстоятельство не критично в случае создания макетного образца для реализации оптимальных законов векторного управления, но приобретает весомое значение при серийном производстве, где наиболее эффективен автономный контроллер ЦОС.

Одним из самых сложных этапов создания системы управления ЭП является отладка разработанных алгоритмов и программного обеспечения. Данное обстоятельство в еще большей степени относится к мощным высоковольтным приводам, где стоимость ошибки в алгоритме или программном обеспечении контроллера на порядок выше. Отладка системы управления на физической модели объекта затруднительно и не всегда даёт правильные результаты из-за несоблюдения коэффициентов подобия.

В качестве одного из вариантов модели объекта управления можно использовать компьютерную имитационную модель электрической машины, работающую в реальном масштабе времени в среде моделирования *Matlab Simulink* на ЭВМ типа *IBM PC*, и связанную через плату аналогового и дискретного ввода/вывода с отлаживаемым контроллером.

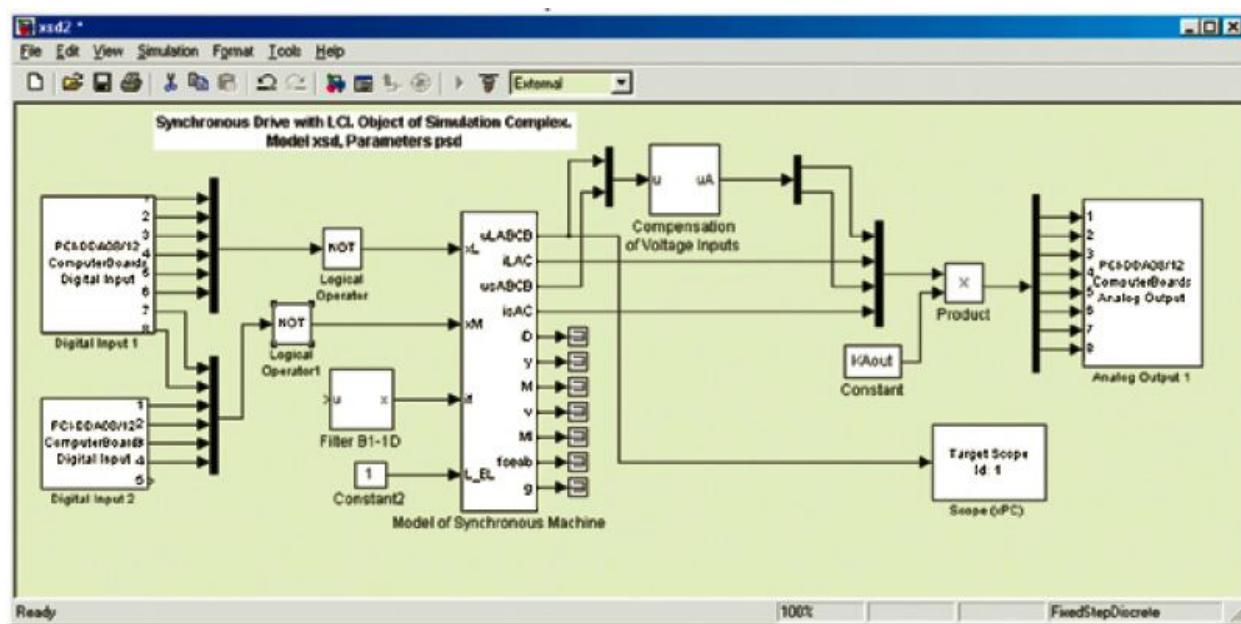


Рис. 5. Отладочная *Simulink*-модель системы управления ЭП

Так, контроллер получает сигналы обратной связи о токах и напряжениях выпрямителя и инвертора привода, а компьютерная модель силового ПЧ, в свою очередь, получает импульсы управления тиристорами. Для модели электропривода задаются необходимые длительности циклов вычислений для отдельных подсистем модели, программно коммутируются входы и выходы.

Проведенное сравнение результатов, полученных с помощью имитационной модели<sup>7</sup>, с расчётами и результатами экспериментов подтвердили правомерность использования такой технологии для всех штатных и, самое главное, нештатных режимов работы привода.

Предложенная функциональная схема системы управления каскадом *АВД* и подробно рассмотренные ее составные элементы, в частности различные типы контроллера *DSP* (*ЦОС*), позволят в дальнейшем разработать современную систему частотно-регулируемого *ЭП* с оптимальными законами векторного управления.

### Список использованной литературы

<sup>1</sup>Тутаев, Г.М. Математическая модель двигателя двойного питания при векторном управлении / Г.М Тутаев, А.Н. Ломакин // Изв. ВУЗов. Электромеханика. – 2007. – №5. – С. 8–14.

<sup>2</sup>Тутаев, Г.М. Моделирование динамических процессов в обобщенной электромеханической системе / Г.М Тутаев, И.В. Гуляев, А.Н. Ломакин, И.С. Юшков // Материалы IX международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП-2008)». В 7 томах.- Новосибирск: Изд. - во Новосибирского гос. техн. ун-та, 2008.– Т 7. С. 129–133.

<sup>3</sup>Гуляев, И.В. Моделирование режима упора электропривода на базе машины двойного питания / И.В. Гуляев, Г.М Тутаев, А.Н. Ломакин // Сборник трудов Международной научно-технической конференции «Энергетика–2008». Изд-во Каз.-го ГЭУ, 2008, С. 26 –30.

<sup>4</sup>Козаченко, В.Ф. Серия модульных встраиваемых микроконтроллерных систем управления для современного комплектного электропривода / В.Ф. Козаченко // Сборник материалов V международной (XVI Всероссийской) научной конференции по автоматизированному электроприводу «АЭП-2007»: 17-21 сентября. – СПб, 2007. – С. 23–26.

<sup>5</sup>Козаченко, В.Ф. Применение DSP-микроконтроллеров фирмы «Texas Instruments» в преобразователях частоты «Универсал» с системой векторного управления / В.Ф. Козаченко, Н.А. Обухов, С.А. Трофимов, П.В. Чуев // Электронные компоненты. – 2002. – № 4. – С. 61–64.

<sup>6</sup>Вейнгер, А. Использование контроллера ЦОС *TORNADO-30* для управления электроприводом / А. Вейнгер, А. Новаковский, П. Тикоцкий // Современные технологии автоматизации. – 1997. – № 4. – С. 88–92.

<sup>7</sup>Блинов, А. Система управления мощным высоковольтным электроприводом на базе процессоров ЦОС *TMS320C3x* / А. Блинов, А. Вейнгер, В. Максимов, А. Максимов, А. Новаковский, А. Яковлев // CHIP NEWS. Цифровая обработка сигналов. – 2003. – № 5 (78). – С. 58–63.

### Сведения об авторах

**Тутаев Геннадий Михайлович** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматики Мордовского госуниверситета. Закончил факультет электроники и автоматики Мордовского госуниверситета в 1986 г. В 2002 году защитил кандидатскую диссертацию.

**Ломакин Алексей Николаевич** – инженер кафедры автоматики Мордовского госуниверситета. Закончил факультет электроники Мордовского госуниверситета в 2004 г., аспирантуру в 2007 г.