

## ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЙ УНИФИЦИРОВАННЫЙ КОНТРОЛЛЕР НА ОСНОВЕ DSP TMS320F28335 ДЛЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**Введение.** Возрастающие требования к качеству регулирования механических координат и энергетической эффективности, которые предъявляются к электромеханическим системам (ЭМС) со стороны технологических применений, приводят к постоянному усовершенствованию алгоритмов управления координатами электрических машин. Зачастую этого можно достичь с применением элементов искусственного интеллекта, методов адаптивного и оптимального управления, что требует от управляющего контроллера высокой вычислительной способности и достаточной точности представления данных. С другой стороны, за последние годы на рынке цифровых сигнальных процессоров (ЦСП) появилось значительное количество изделий, которые имеют специализированный для электромеханических систем набор периферийных модулей, высокую производительность и низкую стоимость [1]. Потенциально, эти устройства позволяют выполнить практическую реализацию большинства сложных алгоритмов управления электромеханическими преобразователями, что обуславливает целесообразность проектирования новых контроллеров управления с их использованием.

Целью данной статьи является представление результатов разработки и тестирования высокопроизводительного унифицированного контроллера на основе 32-разрядного ЦСП TMS320F28335 [2] фирмы Texas Instruments (TI), предназначенного для построения электромеханических систем с двигателями переменного и постоянного тока.

**Аппаратная часть.** Функциональная схема разработанного унифицированного контроллера показана на рис. 1. Ядро контроллера основано на ЦСП, который является одной из последних разработок Texas Instruments и принадлежит к семейству высокопроизводительных процессоров семейства Delfino (C2000). Декларируемая TI производительность процессора при частоте 150 МГц составляет 300 MFLOPS [1]. Рассматриваемый ЦСП специализирован для построения систем управления электроприводами и полупроводниковыми преобразовательными устройствами, содержит 32-разрядное ядро с модулем выполнения операций над вещественными числами (Floating Point Unit), модули прямого доступа к памяти и обработки прерываний, а также широкий набор коммуникационных интерфейсов и периферийных модулей.

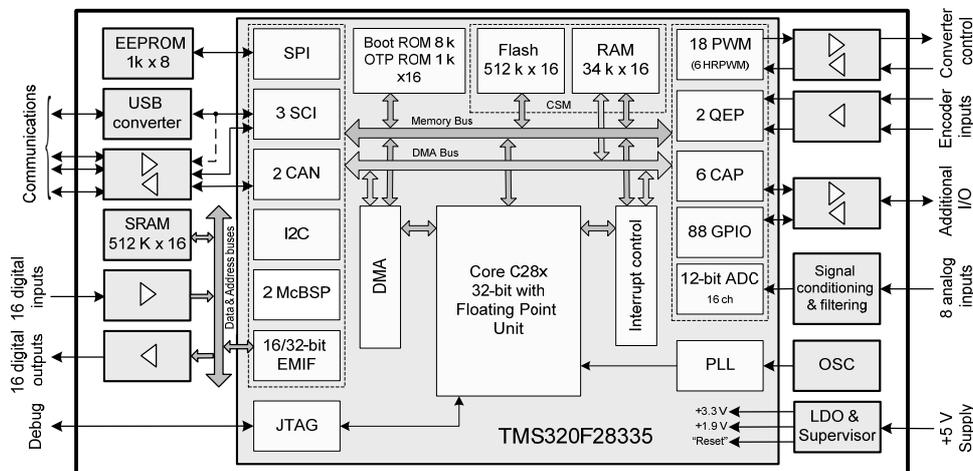


Рис. 1. Функциональная схема унифицированного контроллера

Конструктивное выполнение контроллера обеспечивает возможность его встраивания как в существующие, так и в разрабатываемые силовые преобразователи. При этом следует отметить, что используемый ЦСП входит в серию полностью совместимых по выводам процессоров, которые имеют разную производительностью и объемы интегрированной памяти, что позволяет дополнительно оптимизировать стоимость серийной продукции в зависимости от сложности решаемой задачи.

Специализированные периферийные модули ЦСП, такие как генераторы широтно-импульсной модуляции (ШИМ (PWM)), обработчики квадратурных сигналов от фотоимпульсных датчиков скорости (QEP), модули захвата сигналов (CAP), аналогово-цифровой преобразователь (ADC), используемые для построения управляющих устройств электротехнических и электромеханических систем характеризуются высокими показателями качества первичной обработки сигналов и гибкостью настройки под различные схемотехнические решения. Данные свойства сохранены и в схемах согласования сигналов, расположенных на плате контроллера, с целью обеспечения достаточно высокого уровня унификации. Как видно из рис. 1, в контроллере предусмотрена возможность использования высокоскоростных коммуникационных интерфейсов, что позволяет строить распре-

деленные системы управления в реальном времени, осуществлять визуализацию динамических процессов и производить настройку системы. Основные характеристики контроллера приведены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики контроллера

Тактовая частота, разрядность ядра/памяти	150МГц, 32-bit/16-bit.
Память	256k x 16 Flash, 34k x 16 SRAM, 8k x 16 Boot ROM 1k x 16 OTP ROM (on-chip); 512k x 16 SRAM, 1k x 8 Serial EEPROM (on-board).
Количество универсальных аналоговых входов	8, 12 разрядный АЦП с временем преобразования 80 нс.
Дискретные входы/ выходы	16/16.
Управление силовыми преобразователями	9 конфигурируемых ШИМ выходов; 6 входов для сигналов драйверной защиты силовых ключей.
Сигналы фотоимпульсных датчиков скорости; модули захвата сигналов	2 канала для подключения фотоимпульсных датчиков скорости/положения; до 6 входов модуля захвата сигналов.
Коммуникационные интерфейсы	USB 2.0 (on-board); 1 синхронный последовательный порт; 2 асинхронных последовательных порта; сигналы CAN интерфейса для внешнего трансивера.
Программирование и отладка	Интерфейс JTAG, три отладочных светодиода.
Габаритные размеры, питание	125 x 80 x 25, +5 В.

**Программное обеспечение.** Разработка и отладка программного обеспечения контроллера осуществляется с помощью JTAG интерфейса и программного пакета Code Composer Studio 5.3 (CCStudio) [1].

Благодаря высокой производительности процессора, богатой периферии и функциональной гибкости, разработанный контроллер, позволяет реализовать практически любой из известных алгоритмов управления двигателем переменного либо постоянного тока.

Для унифицированного контроллера разработано базовое программное обеспечение (ПО), которое фактически является его операционной системой. ПО имеет типовую структуру, применяемую в системах реального времени, при этом квантование по времени осуществляется по прерываниям аппаратного таймера процессора с регулируемым временным интервалом.

Базовое ПО обеспечивает функционирование системы в трех основных состояниях: сервисном, предназначенном для настройки системы; активном, в котором происходит непосредственно управление объектом; и пост-состоянии срабатывания защит. Дополнительные переходные состояния, возникающие при поступлении и обработке команд пользователя, обеспечивают корректность инициализации системы, алгоритмов управления при их запуске и прочие вспомогательные функции.

Для управления силовыми преобразователями разработаны подпрограммы формирования импульсов управления ключами по законам векторной и скалярной ШИМ [3] с настраиваемым мертвым временем, а также реализована компенсация влияния мертвого времени на процессы управления электрической машиной.

Модуль измерения аналоговых сигналов синхронизирован с процессами генерирования ШИМ так, что аналоговые преобразования осуществляются в моменты времени, когда отсутствует коммутация силовых ключей, что позволяет минимизировать коммутационные помехи в сигналах выходных токов инвертора.

Измерение угловой скорости производится стандартным образом, путем дифференцирования положения с последующей фильтрацией полученного сигнала. При этом используются значения регистра-счетчика импульсов и флаг направления вращения, которые формируются модулем обработки квадратурных сигналов, приходящих от фотоимпульсного датчика скорости.

Связь управляющего контроллера с персональным компьютером (ПК) организована с использованием USB-интерфейса. Для настройки систем построенных на основе разработанного унифицированного контроллера разработано специальное программное обеспечение, которое дает возможность считывать и устанавливать необходимые значения параметров, а также визуализировать процессы в реальном масштабе времени, с последующим сохранением результатов в удобных для дальнейшего анализа форматах. Во время проведения эксперимента одновременно могут отображаться до 16 внутренних переменных контроллера с дискретностью 200..800 мкс, что значительно превышает возможности серийных приводов и сопоставимо с характеристиками современных экспериментальных установок [4].

Таким образом, разработанное ПО реализует обязательные для управляющих устройств ЭМС функции, а также обеспечивает качественную визуализацию динамических процессов протекающих в системе. Учитывая высокую производительность и широкие возможности по визуализации процессов, контроллер может быть использован для построения исследовательских лабораторных установок с применением концепции быстрого прототипного тестирования [4]. При этом разработанное базовое ПО, позволяет осуществлять практическую реализацию новых алгоритмов управления в короткие сроки, соизмеримые со временем, которое затрачивается на построение модели в популярных пакетах моделирующих программ.

**Результаты экспериментального тестирования.** С целью выполнения экспериментального тестирования аппаратной и программной части контроллера, изготовлен лабораторный стенд, в состав которого входят: тестируемый контроллер; пара асинхронных двигателей (АД), соединенных жесткой муфтой; фотоимпульсный датчик скорости с разрешающей способностью 1024 имп/об, закрепленный на валу одного из АД; стандартная

силовая часть преобразователя частоты; датчики тока и напряжения; нагрузочный агрегат. Параметры использованного в экспериментальной установке АД следующие: номинальная мощность 2.2 кВт, номинальный момент 15 Нм,  $R_1 = 3.5 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 2.1 \text{ Ом}$ ,  $L_1 = L_2 = 0.2655 \text{ Гн}$ ,  $L_m = 0.257 \text{ Гн}$ ,  $J = 0.0165 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ .

В контроллере программно реализован алгоритм косвенного векторного управления угловой скоростью [5]. При тестировании использовались следующие настройки: коэффициенты пропорциональной и интегральной составляющих регулятора скорости  $k_\omega = 60$ ,  $k_{\omega i} = 1800$ ; коэффициенты пропорциональной и интегральной составляющих регуляторов тока:  $k_i = 700$ ,  $k_{ii} = 122500$ . При исследованиях использовалась последовательность операций управления, представленная на Рис. 2: во время начального интервала времени  $0 \leq t < 0.25 \text{ с}$  машина возбуждается, траектория заданного потока сцепления начинается с  $\psi^*(0) = 0.02 \text{ Вб}$  и достигает значения  $0.96 \text{ Вб}$  с первой и второй производными, равными  $4.7 \text{ Вб/с}$  и  $94 \text{ Вб/с}^2$  соответственно; начиная с  $t = 0.5 \text{ с}$  двигатель без нагрузки разгоняется по заданной траектории скорости, которая имеет нулевое начальное значение и достигает  $15 \text{ рад/с}$ , с первой и второй производными, равными  $187.5 \text{ рад/с}^2$  и  $9375 \text{ рад/с}^3$  соответственно; в момент времени  $t = 1.1 \text{ с}$  к валу двигателя прикладывается, а при  $t = 1.85 \text{ с}$  снимается постоянный момент нагрузки, равный номинальному значению. Графики переходных процессов в системе векторного управления при выполнении теста показаны на Рис. 3.

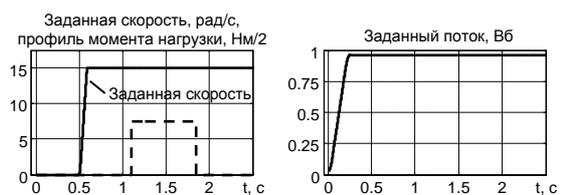


Рис. 2

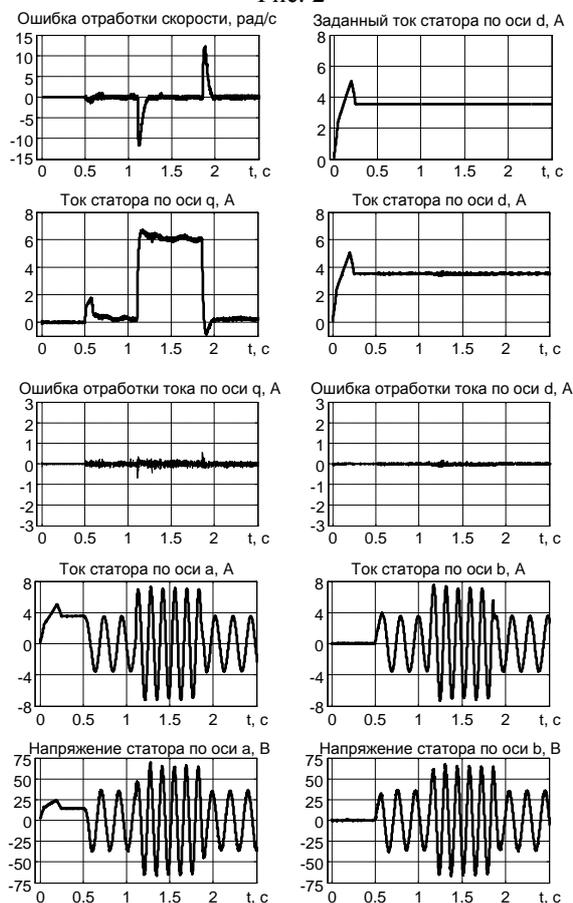


Рис. 3

### Литература.

- [1] C2000 Real-Time Microcontrollers, 2012. Product Brochure. Texas Instruments Incorporated. – Literature Number: sprb176p.pdf.
- [2] TMS320LF28335. Data Manual. Texas Instruments Incorporated. – Literature Number: sprs439m.pdf.
- [3] J.Holtz. Pulse-width modulation – A survey // IEEE Trans on Industrial Electronics. – 1992. – Vol.39. – no 5. – P.410-420
- [4] Пересада С.М., Ковбаса С.Н., Тонелли А. “Станция быстрого моделирования алгоритмов управления электроприводом”// Труды научно-технической конференции «Проблемы автоматизированного электропривода», Алушта, 1999, с. 190 – 194.
- [5] S. Peresada, A. Tonielli High performance robust speed-flux tracking controller for induction motor // International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, Vol 14, no. 2-3, 2000, pp. 177 – 200.