

УНИФИЦИРОВАННЫЙ КОНТРОЛЛЕР НА ОСНОВЕ DSP TMS320LF2407 ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

1. Введение

Возрастающая сложность технологических процессов требует от современных электроприводов высоких показателей качества регулирования скорости, положения либо момента. Это, в свою очередь, приводит к созданию новых алгоритмов управления двигателями переменного и постоянного тока. Как правило, эти алгоритмы являются нелинейными, требуют высокой вычислительной мощности устройства управления.

В данной статье рассмотрен контроллер, реализованный на базе специализированного цифрового сигнального процессора (DSP) TMS320LF2407 фирмы Texas Instruments. Этот 16-разрядный процессор, предназначенный для построения систем управления электроприводами, позволяет реализовать практически любой из известных алгоритмов управления двигателем переменного либо постоянного тока. Кроме того, структура процессора ориентирована на управление как инвертором так и управляемым выпрямителем, что позволяет создавать на его основе энергетически эффективные системы электроприводов с рекуперацией энергии.

Интегрированные в кристалл процессора высокоскоростные коммуникационные порты позволяют встраивать такой контроллер в сложные мультипроцессорные системы, как например, гибкие автоматические модули, роботы, и др.

В статье также рассмотрены некоторые специальные возможности процессора в аспекте реализации алгоритма векторного управления асинхронным двигателем (АД) [1]. Приведены полученные экспериментальные результаты тестирования контроллера при управлении АД мощностью 0.75 кВт.

2. Функциональная схема

Функциональная схема системы управления (для случая АД или синхронного двигателя (СД)), показанная на Рис. 1, является стандартной. Все узлы схемы (входной выпрямитель, клампер, зарядное реле, выходной инвертор) управляются от контроллера. При использовании неуправляемого выпрямителя, для управления АД требуется измерение следующих сигналов: два фазных тока двигателя, напряжение звена постоянного тока, сигнал обратной связи по скорости. Для управления входным управляемым выпрямителем добавляются датчики входного тока, напряжения, а так же датчик тока звена постоянного тока.

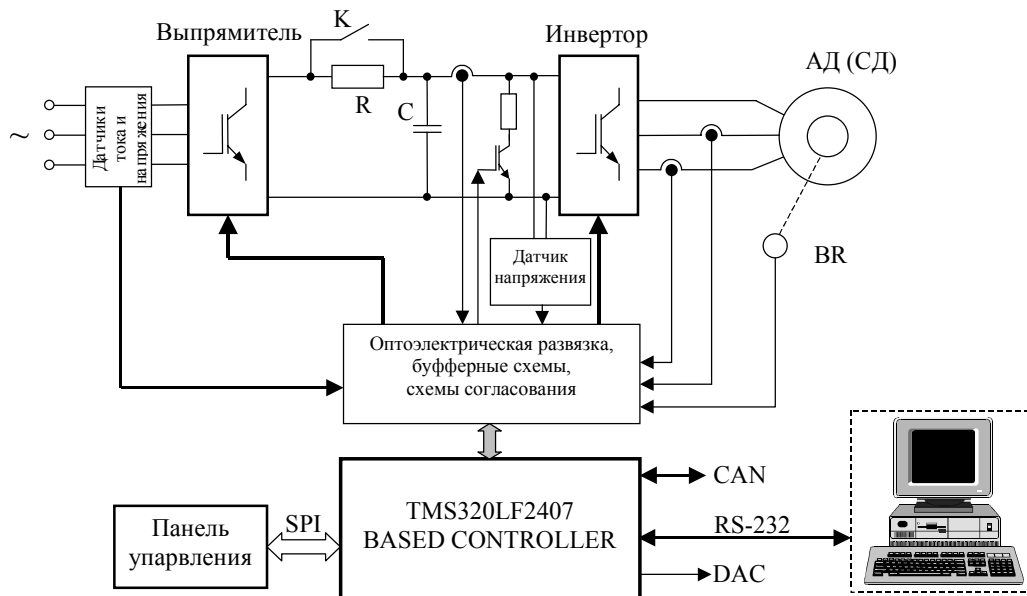


Рис. 1. Функциональная схема системы управления АД (СД).

3. Описание контроллера и структура программного обеспечения

Цифровой сигнальный процессор TMS320LF2407 является специализированным контроллером для систем управления электроприводами. Он входит в семейство процессоров C2000, и является одной из последних разработок фирмы Texas Instruments [2]. Процессоры данного семейства имеют 16 разрядную архитектуру и используют арифметику с фиксированной точкой. Они имеют 32 разрядное АЛУ, производят аппаратное умножение двух 16 разрядных чисел за один такт с сохранением 32 разрядного результата. На кристалле процессора интегрировано: 544x16 бит ОЗУ; 2Kx16 бит памяти данных/программ; 32Kx16 бит секторизированной

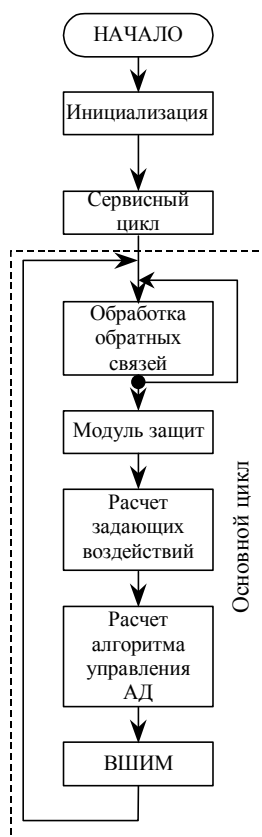


Рис. 2. Структура ПО

флэш-памяти; два менеджера событий, каждый из которых содержит таймеры общего назначения, модули генерирования ШИМ, генераторы «мертвого времени», обработчики квадратурных сигналов импульсных датчиков положения (скорости), входы захвата внешних логических сигналов; 16 каналов 10 разрядных АЦП с временем преобразования 500 нс; интерфейс асинхронного последовательного порта; интерфейс синхронного последовательного порта; сетевой интерфейс CAN; сторожевой таймер; блок формирования и распределения тактовых частот.

Тактовая частота процессора – 30 МГц, время выполнения одной инструкции 33 нс, вычислительная мощность – 30 MIPS. Кроме этого процессор имеет тестовый порт (JTAG) IEEE Std 1149.1. Для создания и отладки программного обеспечения, существуют следующие отладочные средства: TI Code Generation Tools; Полномасштабный эмулятор (XDS510™); Code Composer Studio, eXpress DSP.

Структура созданного программного обеспечения показана на Рис. 2. Сюда входят такие стандартные модули как инициализация; опрос клавиатуры и ввод параметров (сервисный цикл). В основном цикле непосредственно происходит управление двигателем по заданному алгоритму. Основной цикл состоит из: модуля обработки сигналов обратных связей; модуля защит, который обеспечивает защиту от максимального тока, от превышения максимально допустимой скорости, от неустойчивости алгоритма управления; расчет алгоритма управления двигателем; ВШИМ – модуль генерирования векторной ШИМ.

Для отсчета интервалов времени необходимых для формирования ШИМ и периода квантования системы по времени используются два таймера менеджера событий.

Структура модуля реализации алгоритма управления двигателем стандартная, и обеспечивает формирование алгоритмов регулирования тока и скорости, оценивания не измеряемых переменных и т.д.

4. Управление инвертором

Рассматриваемый контроллер позволяет генерировать импульсы управления ключами с использованием технологии скалярной либо векторной ШИМ. При этом поддержка векторной ШИМ реализована на аппаратном уровне.

Прежде чем приступить к описанию методик генерирования ШИМ, рассмотрим более подробно структуру аппаратных средств (Рис.3), отвечающих за эту функцию контроллера.

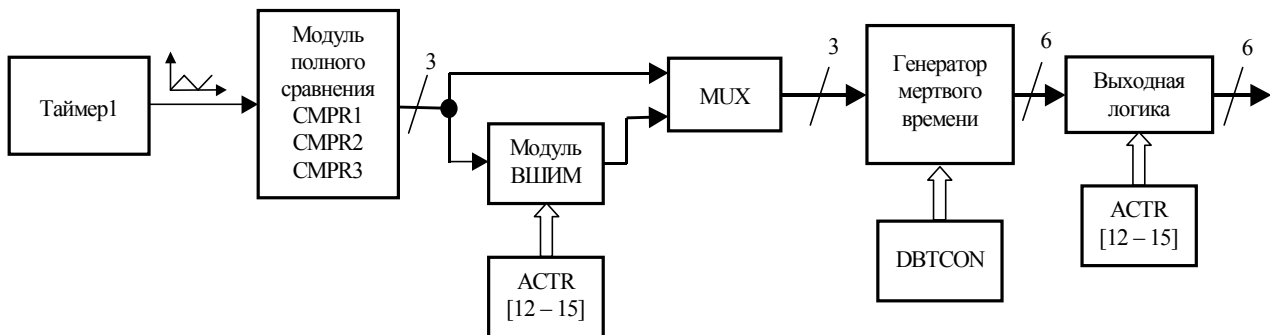


Рис. 3. Структура модуля аппаратной поддержки ВШИМ

Задающим генератором пилообразного сигнала служит Таймер1, сигнал с выхода которого поступает на модуль полного сравнения, который представляет собой три цифровых компаратора, сравнивающих текущее значение счетчика Таймера1 со значениями записанными в регистры CMPR1, CMPR2, CMPR3. Три выходных сигнала модуля сравнения могут поступать либо на модуль векторной ШИМ, либо через мультиплексор на вход генератора мертвого времени. Мультиплексор служит для конфигурации работы контроллера в режиме скалярной либо векторной ШИМ (с использованием аппаратной поддержки).

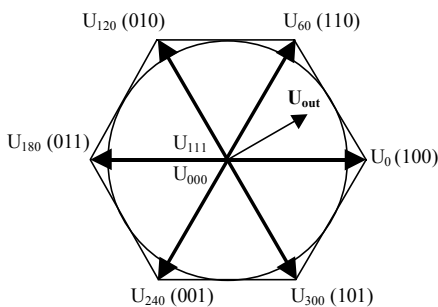


Рис. 4. Пространство состояния ВШИМ

Генератор «мертвого времени» обеспечивает формирование шести импульсов управления ключами инвертора с учетом «мертвого времени», величина которого задается с помощью управляющего регистра DBTCON в диапазоне 0 – 3.2 мкс.

Выходная логика обеспечивает формирование логических импульсов управления ключами инвертора требуемой полярности (прямой либо инверсной логики).

Контроллер позволяет реализовать два метода генерирования векторной ШИМ: классический, когда при прохождении каждого сектора один из столбов инвертора находится в статическом состоянии (ключи не коммутуются); второй метод – с постоянной коммутацией всех ключей инвертора. Поскольку первый метод реализуется с помощью аппаратных средств контроллера, а второй без них, то в [3] они названы соответственно аппаратной ВШИМ и программной ВШИМ. Базируясь на [3] кратко опишем некоторые особенности реализации векторной ШИМ с использованием аппаратных и программных средств.

На Рис. 4, изображены базовые векторы напряжений инвертора и соответствующие им комбинации включения верхних ключей инвертора. Обозначим расчетные длительности включения базовых векторов как T_1 , T_2 , и длительность включения нулевого вектора – T_0 . Для примера будем рассматривать работу в первом секторе (ограниченном векторами U_0 и U_{60}), направление обхода сектора – против часовой стрелки.

Для понимания механизма реализации поддержки векторной ШИМ рассмотрим более подробно структуру регистра АСТР (биты 12 – 15), изображенную на Рис. 5. В каждом такте управления, в зависимости от номера сектора, необходимо задавать комбинацию ключей соответствующую первому базовому вектору (т. е. прикладываемому к нагрузке на время T_1) и направление обхода сектора. Второй базовый вектор определяется автоматически.

K1	K1	K1	DIR
----	----	----	-----

K1 – K3 – комбинация ключей, соответствующая первому базовому вектору
DIR – направление обхода сектора

Рис. 5. Структура регистра АСТР, биты [12 – 15]

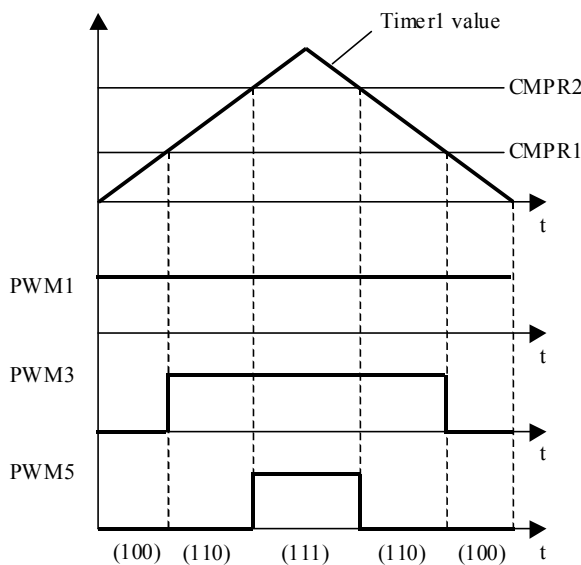


Рис. 6. Сигналы генерируемые аппаратной ВШИМ

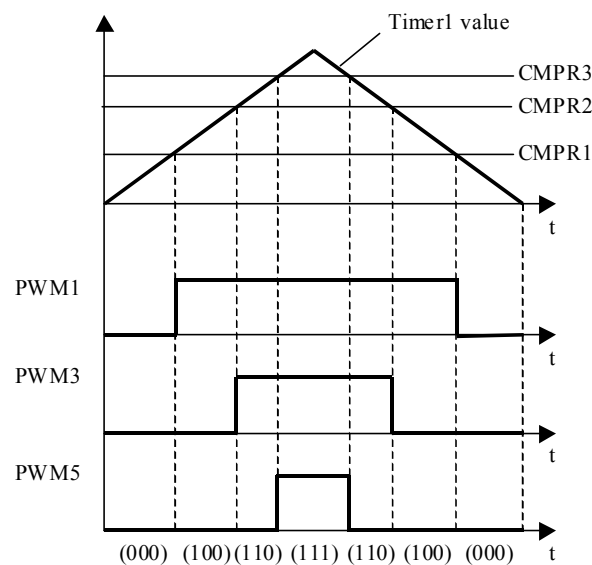


Рис. 7. Сигналы генерируемые при реализации программной ВШИМ.

Таким образом, алгоритм генерирования аппаратной векторной ШИМ для каждого такта управления следующий:

1. Определение сектора, в котором находится вектор заданного напряжения.
2. Расчет длительностей T_1 и T_2 по формуле

$$\begin{pmatrix} T_m \\ T_{m+1} \end{pmatrix} = \frac{\sqrt{3}T_s}{V_d} \begin{bmatrix} \sin\left(m\frac{\pi}{3}\right) & -\cos\left(m\frac{\pi}{3}\right) \\ -\sin\left((m-1)\frac{\pi}{3}\right) & \cos\left((m-1)\frac{\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_a^* \\ u_b^* \end{pmatrix} \quad (1)$$

где: m – номер сектора, $[u_a^*, u_b^*]^T$ – вектор заданного напряжения, T_s – период ШИМ.

3. В зависимости от номера сектора, загрузка кода первого базового вектора и направления обхода в АСТР [12 – 15].
4. Загрузка в регистры модуля полного сравнения значений: $T_1/2 \rightarrow \text{CMPR1}$, и $T_1/2 + T_2/2 \rightarrow \text{CMPR2}$ при направлении обхода против часовой стрелки, или $T_2/2 \rightarrow \text{CMPR1}$, и $T_1/2 + T_2/2 \rightarrow \text{CMPR2}$ при направлении обхода по часовой стрелке.

Далее, аппаратные средства контроллера обеспечат выдачу соответствующих импульсов управления ключами инвертора. При этом сигналы в системе будут иметь вид, показанный на Рис. 6 (при условиях работы указанных выше). Очевидно, что ключи первого столба не коммутуются на протяжении всего периода ШИМ.

Для реализации программной векторной ШИМ, необходимо настроить Таймер1 на режим нарастающего/спадающего счета, выключить поддержку векторной ШИМ. Тогда алгоритм реализации данного метода ШИМ следующий:

1. Определение сектора, в котором находится вектор заданного напряжения.
2. Расчет длительностей T_1 и T_2 по формуле (1) и $T_0 = T_s - T_1 - T_2$.
3. Пересчет полученных значений длительностей по формулам

$$T'_1 = T_0 / 4, T'_2 = T'_1 + T_1 / 2, T'_3 = T'_2 + T_2 / 2 \quad (2)$$
4. Загрузка полученных значений в регистры CMPR1 – CMPR3. При этом соответствие между T'_1, T'_2, T'_3 и CMPR1 – CMPR3 определяется номером сектора и направлением обхода сектора.

Сигналы в системе будут иметь вид, показанный на Рис. 7. Сравняя два рассмотренных алгоритма, отметим, что алгоритм аппаратной ШИМ не использует расчета длительности T_0 , и на каждом периоде ШИМ в каком либо секторе используется только один из нулевых векторов. При программной ШИМ на каждом периоде модуляции используются оба нулевых вектора. Аппаратная ВШИМ, благодаря меньшему числу коммутаций на периоде модуляции, обладает повышенными энергетическими показателями. Программная ВШИМ позволяет получить лучший гармонический состав выходного тока. Кроме того, следует отметить, что ввиду функциональных особенностей некоторых «интеллектуальных модулей», реализация аппаратной ВШИМ для преобразователей построенных на их основе невозможна.

5. Результаты экспериментов

Разработанный контроллер тестировался при управлении АД мощностью 0.75 кВт со следующими параметрами: $R_1=11$ Ом, $R_2=5.6$ Ом, $L_1=0.95$ Гн, $L_2=0.95$ Гн, $L_m=0.91$ Гн, $J=0.0035$ кг·м².

Тестирование выполнялось при следующей последовательности операций управления:

1. Возбуждение АД на протяжении интервала времени от 0 до 0.3 с по заданной траектории начиная с $\psi^*(0)=0.02$ Вб до установившегося значения $\psi^* = 0.9$ Вб.
2. Ненагруженный двигатель обрабатывает заданную траекторию скорости начинающуюся с 0 и достигающую заданного значения, равного 50 рад/с.
3. При работе с постоянной скоростью прикладывается и снимается номинальный момент нагрузки.
4. Последний интервал времени используется для торможения двигателя.

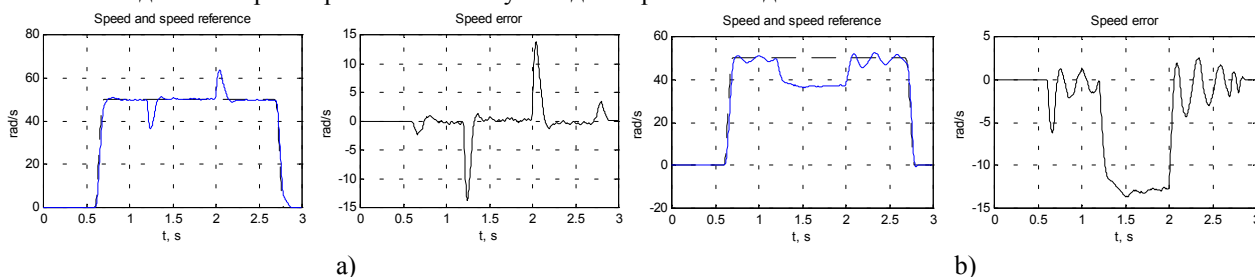


Рис. 8. Результаты тестирования контроллера

Работа контроллера тестировалась при реализации двух алгоритмов управления: векторного (бездатчикового) и частотного. Результаты тестирования для обоих алгоритмов приведены на Рис. 8а и 8б соответственно.

Приведенные результаты показывают, что поведение переменных системы при управлении от рассмотренного контроллера совпадает с поведением при реализации этих алгоритмов на станции быстрого прототипного тестирования [4], основанной на более мощном 32-разрядном DSP, использующем арифметику с плавающей точкой.

6. Заключение

Рассмотрены некоторые особенности построения унифицированного цифрового контроллера для управления электроприводами переменного и постоянного тока. Вычислительная мощность и универсальность контроллера позволяют обеспечить эффективное управление асинхронными, синхронными и двигателями постоянного тока. Результаты тестирования контроллера подтверждают его высокие возможности по реализации различных алгоритмов управления электроприводом технологического оборудования с существующими требованиями к динамическим и статическим показателям.

Литература.

- [1] S. Peresada, A. Tonielli, A. Tilli, S. Kovbasa and M. Montanari. “Simple Sensorless Vector Control of Induction Motors with Natural Field Orientation” IECON – 2001 to appear.
- [2] “TMS320LF2407. Technical Data.” Texas Instruments Incorporated, Huston. SPRS094F.
- [3] Zhenyu Yu, “Space-Vector PWM With TMS320C24x/F24x Using Hardware and Software Determined Switching Patterns”, Digital Signal Processing Solutions, March 1999, Application Report SPRA524.
- [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.