

## Основные тенденции развития встроенных систем управления двигателями и требования к микроконтроллерам

### Введение

Современный электропривод представляет собой конструктивное единство электромеханического преобразователя энергии (двигателя), силового преобразователя и устройства управления. Он обеспечивает преобразование электрической энергии в механическую в соответствии с алгоритмом работы технологической установки. Сфера применения электрического привода в промышленности, на транспорте и в быту постоянно расширяется. В настоящее время уже более 60% всей вырабатываемой в мире электрической энергии потребляется электрическими двигателями. Следовательно, эффективность энергосберегающих технологий в значительной мере определяется эффективностью электропривода. Разработка высокопроизводительных, компактных и экономичных систем привода является приоритетным направлением развития современной техники.

Последнее десятилетие уходящего века ознаменовалось значительными успехами силовой электроники было освоено промышленное производство биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT), силовых модулей на их основе (стойки и целые инверторы), а также силовых интеллектуальных модулей (IPM) с встроенными средствами защиты ключей и интерфейсами для непосредственного подключения к микропроцессорным системам управления. Рост степени интеграции в микропроцессорной технике и переход от микропроцессоров к микроконтроллерам с встроенным набором специализированных периферийных устройств, сделали необратимой тенденцию массовой замены аналоговых систем управления приводами на системы **прямого цифрового управления**

Под прямым цифровым управлением понимается не только непосредственное управление от микроконтроллера каждым ключом силового преобразователя (инвертора и управляемого выпрямителя, если он есть), но и обеспечение возможности прямого ввода в микроконтроллер сигналов различных обратных связей (независимо от типа сигнала: дискретный, аналоговый или импульсный) с последующей программно-аппаратной обработкой внутри микроконтроллера. Таким образом, система прямого цифрового управления ориентирована на отказ от значительного числа дополнительных интерфейсных плат и создание одноплатных контроллеров управления приводами. В пределе встроенная система управления проектируется как однокристалльная и вместе с силовым преобразователем и исполнительным двигателем конструктивно интегрируется в одно целое мехатронный модуль движения.

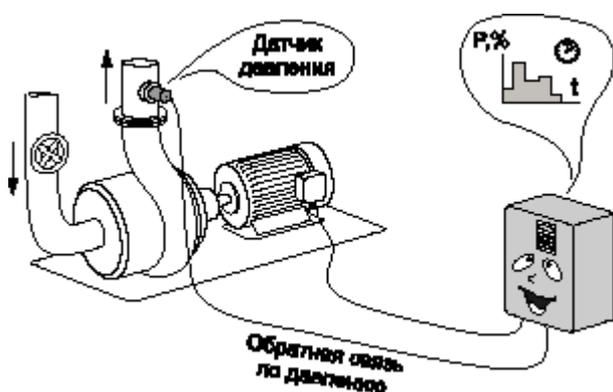
### Основные тенденции

Анализ продукции ведущих мировых производителей систем привода и материалов опубликованных научных исследований в этой области позволяет отметить следующие ярко выраженные тенденции развития электропривода:

- Неуклонно снижается доля систем привода с двигателями постоянного тока и увеличивается доля **систем привода** с двигателями **переменного тока**. Это связано с низкой надежностью механического коллектора и более высокой стоимостью коллекторных двигателей постоянного тока по сравнению с двигателями

переменного тока. По прогнозам специалистов в начале следующего века доля приводов постоянного тока сократится до 10% от общего числа приводов.

- Преимущественное применение в настоящее время имеют **привода с короткозамкнутыми асинхронными двигателями**. Большинство таких приводов (около 80%) нерегулируемые. В связи с резким удешевлением статических преобразователей частоты доля **частотно-регулируемых асинхронных электроприводов** быстро увеличивается.
- Естественной альтернативой коллекторным приводам постоянного тока являются привода с **вентильными**, т. е. электронно-коммутируемыми **двигателями**. В качестве исполнительных бесколлекторных двигателей постоянного тока (БДПТ) преимущественное применение получили синхронные двигатели с возбуждением от постоянных магнитов или с электромагнитным возбуждением (для больших мощностей). Этот тип привода наиболее перспективен для станкостроения и робототехники, однако, является самым дорогостоящим. Некоторого снижения стоимости можно добиться при использовании синхронного реактивного двигателя в качестве исполнительного.
- Приводом следующего века по прогнозам большинства специалистов станет привод на основе **вентильно-индукторного двигателя (ВИД)**. Двигатели этого типа просты в изготовлении, технологичны и дешевы. Они имеют пассивный ферромагнитный ротор без каких-либо обмоток или магнитов. Вместе с тем, высокие потребительские свойства привода могут быть обеспечены только при применении мощной микропроцессорной системы управления в сочетании с современной силовой электроникой. Усилия многих разработчиков в мире сконцентрированы в этой области. Для типовых применений перспективны индукторные двигатели с самовозбуждением, а для тяговых приводов индукторные двигатели с независимым возбуждением со стороны статора. В последнем случае появляется возможность двухзонного регулирования скорости по аналогии с обычными приводами постоянного тока.



**Рис. 1 Интеграция управления двигателем и технологическим процессом**

- Для большинства массовых применений приводов (насосы, вентиляторы, конвейеры, компрессоры и т.д.) требуется относительно небольшой диапазон регулирования скорости (до 1:10, 1:20) и относительно низкое быстродействие. При этом целесообразно использовать классические структуры **скалярного управления**. Переход к широкодиапазонным (до 1:10000), быстродействующим приводам станков, роботов и транспортных средств, требует применения более сложных структур **векторного управления**. Доля таких приводов составляет сейчас около 5% от общего числа и постоянно растет.
- В последнее время на базе систем векторного управления разработан ряд приводов с **прямым цифровым управлением моментом**. Отличительной особенностью

этих решений является предельно высокое быстродействие контуров тока, реализованных, как правило, на базе цифровых релейных регуляторов или регуляторов, работающих на принципах нечеткой логики (фаззи-логики). Системы прямого цифрового управления моментом ориентированы в первую очередь на транспорт, на использование в кранах, лифтах, робототехнике.

- Усложнение структур управления приводами потребовало резкого увеличения производительности центрального процессора и перехода к **специализированным процессорам с объектно-ориентированной системой команд**, адаптированной к решению задач цифрового регулирования в реальном времени. Ряд фирм (Intel, Texas Instruments, Analog Devices и др.) выпустили на рынок новые **микроконтроллеры для управления двигателями** (из серии Motor Control) на базе процессоров для обработки сигналов **DSP-микроконтроллеры**. Они не только обеспечивают требуемую производительность центрального процессора (более 20 млн.оп./сек.), но и содержат ряд встроенных периферийных устройств, предназначенных для оптимального сопряжения контроллера с инверторами и датчиками обратных связей. Среди встроенной периферии особое место занимают универсальные **генераторы периодических сигналов**, обеспечивающие самые современные алгоритмы управления инверторами, в частности, алгоритмы **векторной широтно-импульсной модуляции**.
- Рост вычислительных возможностей встроенных систем управления приводами сопровождается расширением их функций. Кроме прямого цифрового управления силовым преобразователем реализуются дополнительные функции поддержки **интерфейса с пользователем** (через пульт оперативного управления), а также **управления технологическим процессом**. Рис. 1 демонстрирует дополнительные возможности современных систем управления преобразователями частоты для приводов насосов. В состав системы управления входят: универсальный регулятор технологической переменной, а также генератор управляющих воздействий на базе часов реального времени. Такое решение позволяет поддерживать давление в трубопроводе на заданном, в соответствии с суточной циклограммой, уровне исключительно средствами электропривода, без использования промконтроллеров.

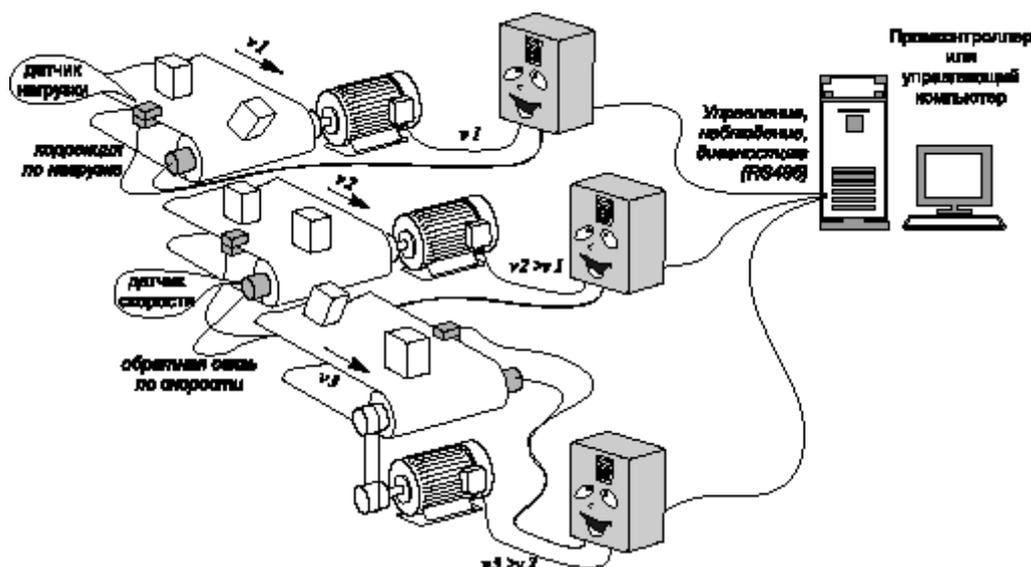


Рис. 2 Распределенные системы управления приводами

- Перспективные системы управления электроприводами разрабатываются с ориентацией на комплексную автоматизацию технологических процессов и согласованную работу нескольких приводов в **составе промышленной сети**.

Управление сетью берет на себя промконтроллер или управляющая ЭВМ рис. 2. Наиболее перспективные типы интерфейсов: RS-485 и CAN. **CAN-интерфейс постепенно** становится стандартом для распределенных систем управления на электрическом транспорте, в автомобильной технике и робототехнике.

- Стремление предельно удешевить привод, особенно для массовых применений в бытовой технике (пылесосы, стиральные машины, холодильники, кондиционеры и т.д.), привело к отказу от датчиков механических переменных и переходу к **системам бездатчикового управления**, где для оценки механических координат привода (положения, скорости, ускорения) используются специальные **цифровые наблюдатели**. Это возможно только при высокой производительности центрального процессора, когда система дифференциальных уравнений, описывающих поведение привода, может быть решена в реальном времени.
- Возросшие возможности микропроцессорной техники привели к тому, что при массовом производстве изделий с объемом выпуска не менее 10000 штук в год, оказывается возможным и экономически целесообразным создание мощных, **однокристалльных систем управления приводами** на базе DSP-микроконтроллеров. Их стоимость при ограниченных интерфейсных функциях не будет превышать 10-20\$.
- Основные затраты при разработке систем управления приводами приходится не на создание аппаратной части контроллера, а на разработку алгоритмического и программного обеспечения. Поэтому роль специалистов в области теории электропривода существенно возрастает.

### Типовые структуры перспективных систем управления приводами переменного тока

На рис. 3 показана структура привода переменного тока с векторным управлением. В качестве исполнительного двигателя может применяться либо синхронный двигатель с активным магнитоэлектрическим ротором, либо синхронный реактивный двигатель. Возможно использование этой структуры и для управления трехфазными вентильно-индукторными двигателями с разнополярным питанием, а также шаговыми двигателями в режиме бесколлекторных двигателей постоянного тока.

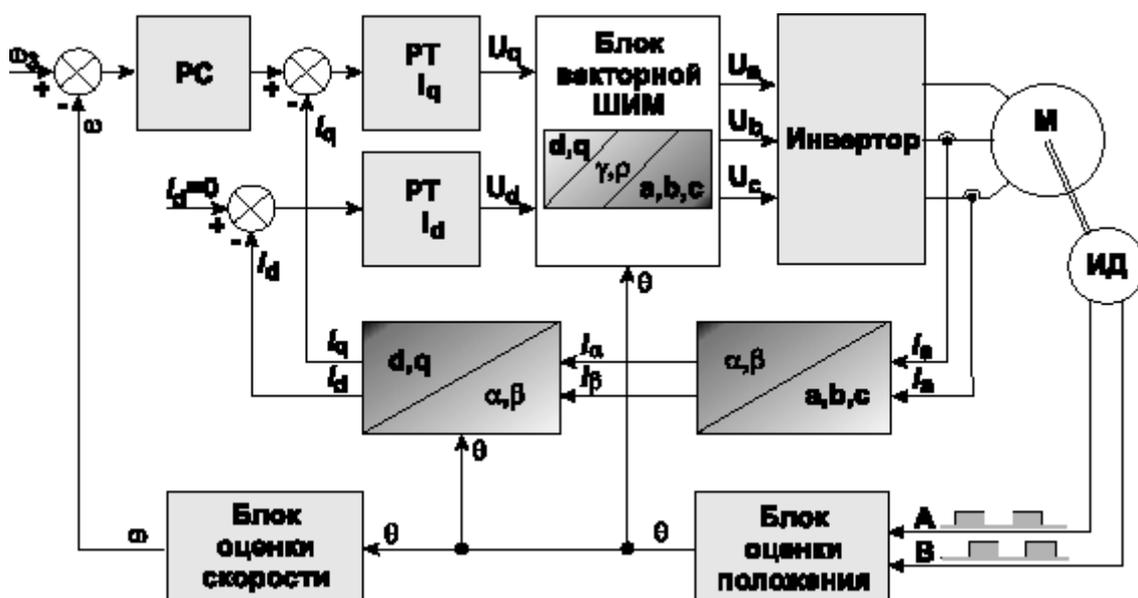


Рис. 3 Структурная схема привода переменного тока с векторным управлением

В качестве силового преобразователя используется инвертор на IGBT-ключках или интеллектуальных силовых модулях. Драйверы ключей инвертора подключены непосредственно к выходам **ШИМ-генератора** микроконтроллера (А, А/, В, В/, С, С/), работающего в режиме **широтно-импульсной модуляции базовых векторов** (векторной ШИМ-модуляции), что обеспечивает максимально высокую степень использования напряжения звена постоянного тока и минимизацию динамических потерь в инверторе (ниже более подробно).

Структура на рис. 3 предполагает использование импульсного датчика положения ротора двигателя. Сигналы с датчика вводятся непосредственно в контроллер и обрабатываются в блоке оценки положения, который может быть реализован на основе специального периферийного устройства **таймера с "квадратурным" режимом работы**. Код механического положения ротора программно преобразуется в код электрического положения ротора внутри полюсного деления машины  $q$ . Для реализации блока оценки скорости могут применяться либо специальные периферийные устройства микроконтроллера, принцип действия которых основан на измерении временного интервала отработки двигателем заданного отрезка пути (**эстиматоры скорости**), либо периферийные устройства общего назначения, такие как **процессоры событий** или **менеджеры событий**. В последнем случае таймер, работающий в "квадратурном" режиме является базовым для одного из каналов сравнения. Как только двигатель отработает заданный отрезок пути, возникнет прерывание по сравнению. В процедуре обслуживания этого прерывания центральный процессор определит временной интервал с момента предыдущего прерывания и выполнит расчет текущей скорости привода  $w$ .

Желательно, чтобы таймер, работающий в "квадратурном" режиме допускал начальную инициализацию в соответствии с числом меток на оборот импульсного датчика положения, а также имел режим автоматической коррекции своего состояния по реперному датчику. Эстиматор скорости должен работать с регулируемым разрешением как по числу импульсов на периоде измерения скорости (от 1 до 255), так и с регулируемым разрешением по времени (максимальное разрешение 50-100 нс при диапазоне регулирования разрешения 1:128). Если перечисленные выше требования к периферийным устройствам микроконтроллера будут выполнены, то окажется возможным измерение скорости в диапазоне, как минимум, 1:20000 с точностью, не хуже 0,1%.

Для измерения электрических переменных микроконтроллер должен иметь **встроенный АЦП** с разрешением не ниже 10-12 двоичных разрядов и временем преобразования не хуже 5-10 мкс. Как правило, восьми каналов АЦП достаточно для приема не только сигналов обратных связей по токам фаз (рис. 3), но и сигналов обратных связей по напряжению и току в звене постоянного тока, а также внешних задающих сигналов. Дополнительные аналоговые сигналы используются для реализации защит инвертора и двигателя. Работа АЦП будет более производительной, если микроконтроллер допускает режим автоматического сканирования и запуска процесса преобразования. Обычно это делается либо с помощью отдельного периферийного устройства **процессора периферийных транзакций**, либо с помощью **режима автозапуска АЦП** от процессора событий или генератора ШИМ-сигналов. Желательно, чтобы выборка как минимум двух аналоговых сигналов была одновременной.

Итак, на основе полученной информации о токах фаз  $i_a$  и  $i_b$  восстанавливается значение тока в фазе С ( $i_c$ ) и выполняется преобразование токов к неподвижной системе координат, связанной со статором ( $a, b, c$  @  $a, b$ ). Переход от неподвижной системы координат к подвижной, связанной с текущим положением ротора ( $a, b$  @  $d, q$ ), позволяет рассчитать компоненты результирующего вектора тока статора по осям  $d$  и  $q$  соответственно.

Известно, что момент синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов прямо пропорционален составляющей вектора тока статора по поперечной оси  $q$ . При этом для минимизации общего потребляемого двигателем тока желательно поддерживать



#### Рис. 4 Блок-схема системы управления бесколлекторным двигателем постоянного тока

Особенность схемы состоит в том, что ШИМ-генератор обеспечивает сразу две функции: автокоммутацию фаз двигателя по сигналам датчика положения и поддержание тока на заданном уровне путем регулирования приложенного к обмоткам двигателя напряжения. Первая функция может быть реализована автоматически, если генератор имеет встроенный **блок управления выходами**, допускающий прием команд от процессора событий. Вторая функция традиционна и реализуется путем изменения скважности ШИМ-сигналов.

Для оценки положения ротора двигателя можно использовать либо датчик положения на элементах Холла, либо более дорогой импульсный датчик положения. В первом случае сигналы с датчика положения вводятся в микроконтроллер на входы **модулей захвата процессора событий**. Обработка двигателем каждого целого шага идентифицируется процессором событий и вызывает автокоммутацию ключей инвертора. Прерывание, возникающее при каждом захвате фронта сигнала с датчика, используется для оценки времени между двумя соседними переключениями и, далее, скорости привода.

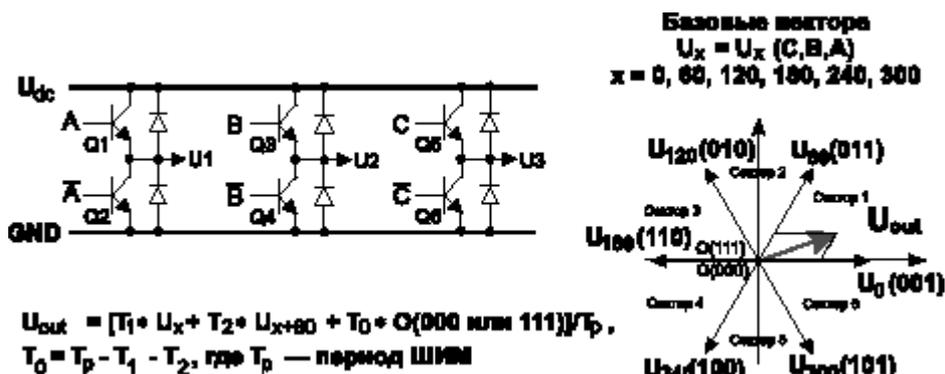
Во втором случае можно получить более точную информацию о текущем положении ротора двигателя и о его скорости, что может потребоваться в приводах с интеллигентным управлением углом коммутации в функции скорости.

Таким образом, полноценные системы векторного управления приводами переменного тока требуют для своей реализации высокопроизводительных микроконтроллеров с широким набором перечисленных выше встроенных периферийных устройств, допускающих совместную работу и требующих от центрального процессора минимальных ресурсов на свое обслуживание.

#### Способы реализации широтно-импульсной модуляции базовых векторов

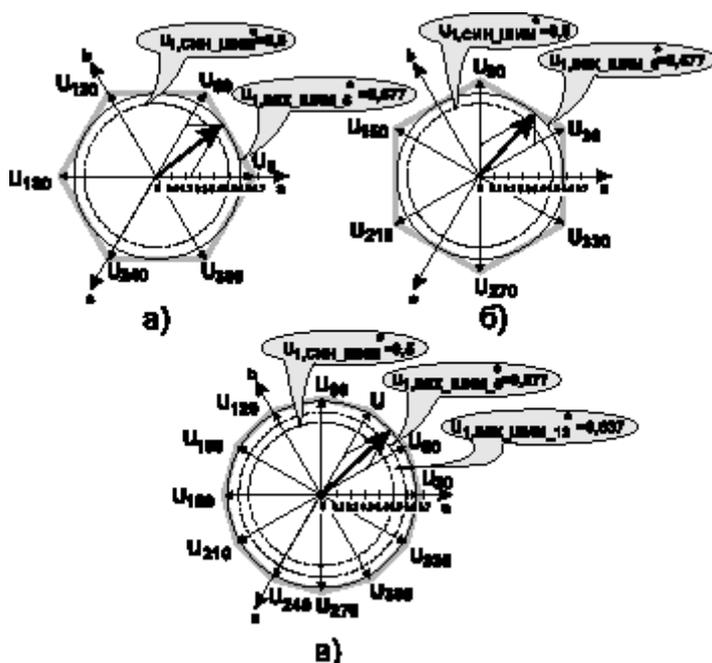
Большинство выпускаемых сегодня преобразователей частоты для регулирования скорости вращения трех-фазных двигателей обеспечивают управление инвертором напряжения в режиме **синусоидальной центрированной (симметричной) широтно-импульсной модуляции**.

Суть метода состоит в одновременном управлении на заданной несущей частоте (обычно 10-20 кГц) сразу всеми шестью ключами инвертора (рис. 5) таким образом, что в средних точках каждой стойки инвертора формируются волны синусоидального выходного напряжения  $U_1, U_2, U_3$ , сдвинутые друг относительно друга на 120 электрических градусов. При этом верхний и нижний ключи всегда коммутируются в противофазе и максимальная амплитуда выходного сигнала равна половине напряжения на звене постоянного тока  $U_{dc}/2$ . Если для формирования напряжения  $U_{dc}$  использовать стандартный неуправляемый выпрямитель, то двигатель окажется недоиспользованным по напряжению примерно на 15%.



**Рис. 5 ШИМ-модуляция базовых векторов**

Для того, чтобы обеспечить номинальные параметры исполнительного двигателя, разработчики были вынуждены идти на искажение формы выходного напряжения в зоне частот, близких к номинальной, т.е. переходить от синусоидальной формы выходного напряжения к трапецеидальной (в пределе к прямоугольной). Очевидно, что такое решение устраивало далеко не всех потребителей, и работы по поиску более совершенных методов управления продолжались. Теория этого вопроса активно развивалась зарубежными и отечественными учеными на протяжении более чем 10 лет. Сегодня мы можем констатировать, что все теоретические вопросы решены и, более того, **аппаратно поддержаны** в конструкциях встроенных ШИМ-генераторов ряда специализированных микроконтроллеров серии Motor Control.



**Рис. 6 Сравнительный анализ различных методов ШИМ-модуляции базовых векторов**

Суть метода, получившего название **широтно-импульсной модуляции базовых векторов** (векторной ШИМ-модуляции), состоит в отказе от одновременной коммутации всех ключей инвертора и в переходе к коммутации между несколькими, заранее выбранными состояниями инвертора, каждое из которых соответствует определенному пространственному положению вектора результирующего напряжения, приложенного к двигателю. В таблице показаны схемы включения силовых ключей и векторные диаграммы для наиболее часто используемого набора базовых векторов, соответствующего стандартной 6-тактной коммутации 1; 0,5; 0,5 (верхний ключ, два нижних или два верхних, нижний).

Имея восемь базовых векторов, два из которых "нулевые", а остальные сдвинуты в пространстве на 60 электрических градусов (рис. 5), можно воспроизвести любой требуемый вектор выходного напряжения путем переключения на периоде ШИМ между двумя базовыми векторами текущего сектора  $U_x$  и  $U_{x+60}$  и нулевыми векторами  $O(000)$  и  $O(111)$ .

Амплитуда и фаза результирующего вектора напряжения зависят исключительно от скважности включения базовых векторов. Как показано на рис. 6а, в предельном случае, когда нулевые вектора не используются, годограф вектора результирующего напряжения

представляет собой шестиугольник, описанный вокруг базовых векторов. С учетом того, что амплитуда базового вектора составляет  $2/3 U_{dc}$ , возможно формирование кругового годографа вектора результирующего напряжения с амплитудой  $0,577 U_{dc}$ , что на 15% больше амплитуды выходного напряжения для случая классической синусоидальной центрированной ШИМ.

**Таблица Схемы включения и векторные диаграммы для инвертора в режиме ШИМ-модуляции базовых векторов**

| Базовый вектор |     | Схема включения и векторная диаграмма |   |  | Фазные напряжения ( $U_{\phi}/U_{dc}$ ) |       |          |          |          |
|----------------|-----|---------------------------------------|---|--|---|-------|----------|----------|----------|
| Название       | Код |                                       |   |  | $U_c$                                   | $U_b$ | $U_a$    |          |          |
|                | C   | B                                     | A |  |   |       |          |          |          |
| O(000)         | 0   | 0                                     | 0 |  |   |       | 0        | 0        | 0        |
| $U_0(001)$     | 0   | 0                                     | 1 |  |   |       | $-(1/3)$ | $-(1/3)$ | $+(2/3)$ |
| $U_{60}(011)$  | 0   | 1                                     | 1 |  |   |       | $-(2/3)$ | $+(1/3)$ | $+(1/3)$ |
| $U_{120}(010)$ | 0   | 1                                     | 0 |  |   |       | $-(1/3)$ | $+(2/3)$ | $-(1/3)$ |
| $U_{180}(110)$ | 1   | 1                                     | 0 |  |   |       | $+(1/3)$ | $+(1/3)$ | $-(2/3)$ |
| $U_{240}(100)$ | 1   | 0                                     | 0 |  |   |       | $+(2/3)$ | $-(1/3)$ | $-(1/3)$ |

|                |   |   |   |  |          |          |          |
|----------------|---|---|---|--|----------|----------|----------|
| $U_{300}(101)$ | 1 | 0 | 1 |  | $+(1/3)$ | $-(2/3)$ | $+(1/3)$ |
| $O(111)$       | 1 | 1 | 1 |  | 0        | 0        | 0        |

Существуют и другие варианты выбора базовых векторов. Так, использование векторов, соответствующих парной реверсивной коммутации фаз двигателя (рис. 6б) обеспечивает ту же самую максимальную амплитуду вектора результирующего напряжения, а переход к базовым векторам, соответствующим 12-тактной коммутации (рис. 6в), позволяет увеличить выходное напряжение инвертора уже на 27%.

Идея реализации векторной ШИМ-модуляции на базе стандартной центрированной ШИМ показана на рис. 7. Используется двухпроходная коммутация с переключением базовых векторов на периоде ШИМ в последовательности:  $O(000)$ ,  $m$ ,  $m+1$ ,  $O(111)$ ,  $m+1$ ,  $m$ ,  $O(111)$ . Метод может быть реализован в большинстве встроенных ШИМ-генераторов современных микроконтроллеров серии Motor Control, однако имеет существенный недостаток необходимость программной коррекции влияния "мертвого" времени в зоне выходных напряжений, близких к максимальному. Кроме того, расчет компонент результирующего вектора во всех обычных микроконтроллерах, кроме DSP-микроконтроллеров, требует значительных ресурсов центрального процессора. Это может привести к невозможности реализации векторной ШИМ-модуляции на высоких частотах несущей (10-20 кГц).

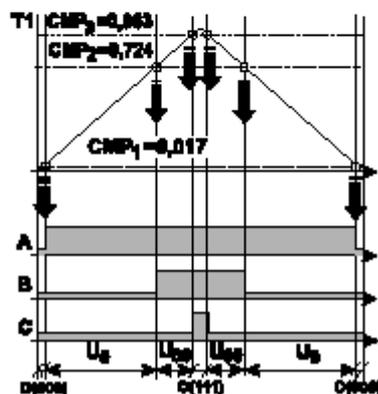
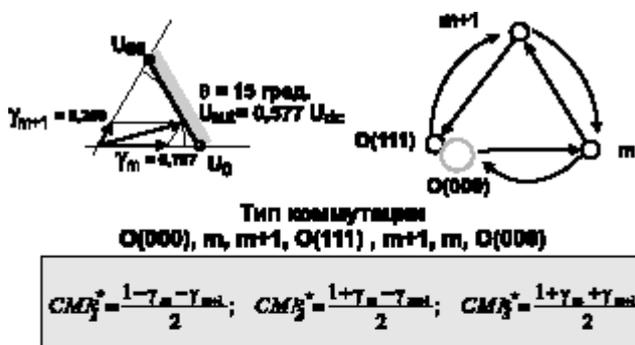


Рис. 7 Реализация векторной ШИМ-модуляции на базе стандартной центрированной ШИМ

Второй способ реализации векторной ШИМ заключается в использовании двух каналов полного сравнения и последовательного управляющего автомата, обрабатывающего события по сравнению рис. 8. Автомат работает по двум различным алгоритмам, в зависимости от выбранного пользователем начального направления переключения базовых векторов:  $(m, m+1)$  или  $(m+1, m)$ . Один из алгоритмов следующий:

- установить в начале периода ШИМ состояние инвертора  $U_m$ ;
- при первом сравнении перевести инвертор в состояние  $U_{m+1}$ ;
- при втором сравнении перевести инвертор в одно из нулевых состояний  $O(000)$  или  $O(111)$ , код которого отличается от кода предыдущего состояния инвертора лишь одним разрядом;
- при третьем сравнении восстановить предыдущее состояние  $U_{m+1}$ ;
- при четвертом сравнении восстановить начальное состояние инвертора  $U_m$ .

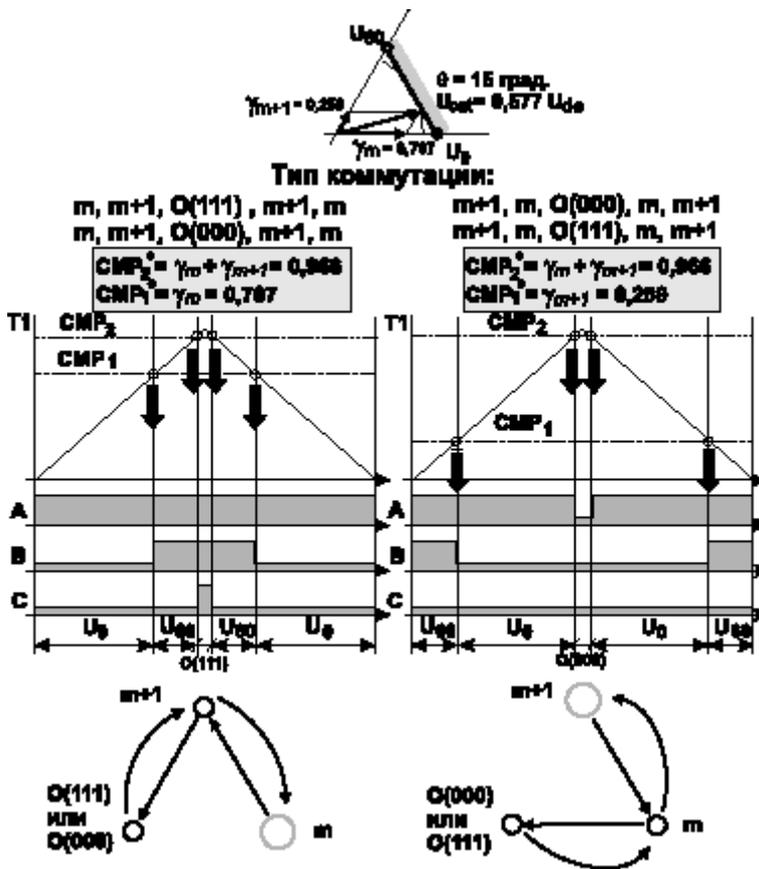
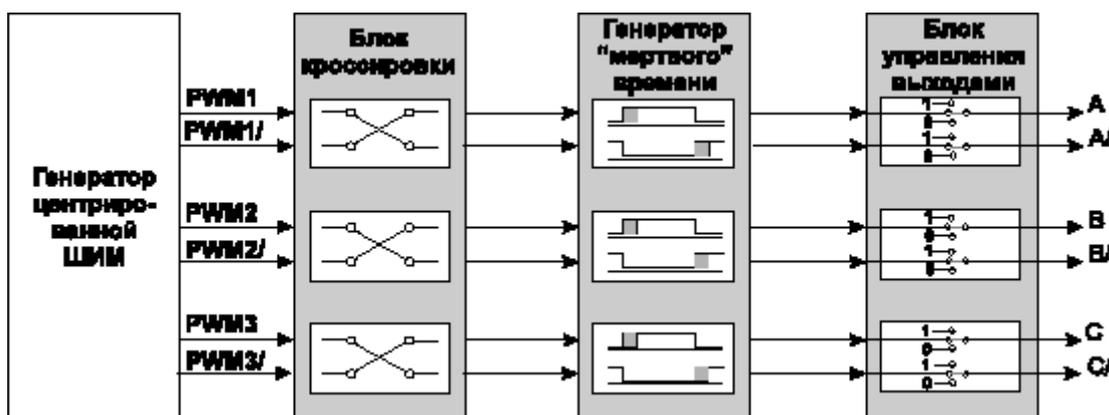


Рис. 8 Реализация векторной ШИМ-модуляции на базе двухканального компаратора и последовательного управляющего автомата

Как видно из рис. 8, второй алгоритм отличается только порядком перебора базовых векторов. Главное отличие между алгоритмами состоит в том, к верхней или нижней шине звена постоянного тока обеспечивается "глухое" подключение одной из фаз на периоде ШИМ (что лучше, зависит от типа используемых при построении инвертора драйверов). Для исключения дополнительных переключений на стыках секторов порядок переключения базовых векторов необходимо менять при каждой смене сектора.



**Рис. 9 Структура универсального генератора периодических сигналов для реализации векторной ШИМ-модуляции**

Одним из важнейших преимуществ метода является уменьшение числа переключений на периоде ШИМ с 6-и до 4-х и сокращение на 30% динамических потерь в ключевых элементах инвертора.

Рассмотренный метод реализации векторной ШИМ использует фирма Texas Instruments в новых микроконтроллерах для управления двигателями серии TMS320x24x. Дополнительный последовательный управляющий автомат включен при этом в состав ШИМ-генератора.

Некоторые фирмы, например, Analog Devices, идут по другому пути, суть которого состоит в возможности кроссирования стандартных выходных сигналов центрированной ШИМ рис. 9.

Это позволяет реализовать все многообразие вариантов управления, показанное на рис. 8. Кроме того, появляется дополнительная возможность поддержки более сложных методов векторной ШИМ, основанных на использовании шести дополнительных базовых векторов. При этом особое значение приобретает встроенный в состав генератора периодических сигналов блок управления выходами, позволяющий индивидуально управлять выходами, вплоть до отключения любого ключа или целой стойки.

В заключение отметим, что, несмотря на серьезную аппаратную поддержку методов векторной ШИМ, появившуюся в новейших микроконтроллерах, работы у программистов не уменьшилось. Они по-прежнему должны обеспечить в реальном времени: расчет номера базового сектора и внутрисекторного угла; определение составляющих базовых векторов и перепрограммирование ШИМ-генератора; коррекцию влияния "мертвого" времени и потерь напряжения на силовых ключах; коррекцию изменения напряжения на звене постоянного тока. Перечисленные задачи являются решаемыми, что дает уверенность в возможности быстрой разработки нового поколения перспективных цифровых систем управления приводами.

#### Литература

1. A.M. Trzynadlowski, R.L. Kirlin, S.F. Legowski. *Space vector PWM technique with minimum switching losses and a variable pulse rate, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 44, no. 2, pp. 173-181, 1997.*
2. Козаченко В.Ф. *Микроконтроллеры: Руководство по применению 16-разрядных микроконтроллеров Intel MCS-196/296 во встроенных системах управления. М.:Эком. 1997. 688 с.*

3. *В.Козаченко, А.Соловьев. Новые DSP-микроконтроллеры фирмы Analog Devices ADMC300/330 для высокопроизводительных систем векторного управления электроприводами переменного тока// CHIP NEWS. 1998. № 5. С. 16-21.*
4. *Козаченко В.Ф., Грибачев С.А. Новые микроконтроллеры фирмы Texas Instrumenst TMS32x24x для высокопроизводительных встроенных систем управления электроприводами// CHIP NEWS. 1998. № 11-12. С. 2-6.*

Московский энергетический институт,  
кафедра Автоматизированного электропривода,  
лаборатория микропроцессорных систем управления  
Тел. (095) 115-7977, факс (095) 273-1348  
E-mail: [kozachenko@aep.mpei.ac.ru](mailto:kozachenko@aep.mpei.ac.ru)