

Широтно-импульсная модуляция в электроприводе переменного тока.

1. Введение

В предшествующие годы широтно-импульсная модуляция (ШИМ) для управления инверторами электроприводов (ЭП) переменного тока реализовывалась средствами аналоговой техники. Обычно ШИМ сигналы получаются путем сравнения треугольного несущего сигнала и сигнала, подлежащего модуляции. Для трехфазных систем необходимы три независимых канала ШИМ: по одному на каждую фазу. Входами такого ШИМ устройства являются заданные фазные напряжения. В разомкнутых частотно-управляемых ЭП эти напряжения формируются на основе принятого закона частотного управления, в замкнутых ЭП – формируются с помощью контроллера.

Современные устройства управления ЭП переменного тока реализуются исключительно на основе цифровой управляющей техники. Отметим, что генерация ШИМ сигналов по своей природе дискретный процесс. В этой связи использование аналогового метода формирования ШИМ сигналов не является оправданным. Значительное количество современных цифровых процессов содержат функцию цифрового формирования ШИМ, реализованную на том же кристалле, что и центральный вычислитель. В этой связи для современных цифровых электроприводов требуются цифровые методы формирования ШИМ сигналов.

2. Скалярная ШИМ.

Дискретный аналог непрерывной ШИМ – *регулярно-дискретизированная ШИМ* (скалярная ШИМ) легко реализуется с помощью аппаратных средств, как в цифровых, так и в аналоговых системах. В аналоговых системах используются аналоговые интеграторы и компараторы для создания треугольного модуляционного напряжения и определения моментов переключения. При цифровой обработке сигнала, интеграторы заменяются цифровыми таймерами, а цифровые сигналы задания сравниваются с дискретным несущим сигналом с высокой частотой повторения. Чтобы освободить микропроцессор от отнимающей много времени задачи сравнения двух переменных во времени сигналов, производимой с высокой частотой повторения, соответствующие функции обработки сигналов выполнены аппаратно "на чипе" (англ. on chip).

Формирование ШИМ возможно по двум схемам – разомкнутой и замкнутой. На практике наиболее широко используются схемы с разомкнутым циклом генерирования ШИМ. В таких схемах в качестве входного сигнала используется пространственный вектор задания $\mathbf{u}^*(t)$, а коммутируемое трехфазное напряжение формируется коммутацией напряжения постоянного тока V_d таким образом, чтобы усредненный по времени нормированный фундаментальный пространственный вектор $\mathbf{u}(t)$ равнялся усредненному по времени вектору задания напряжения. Общая структура разомкнутого цикла генерирования ШИМ представлена на Рис. 1.

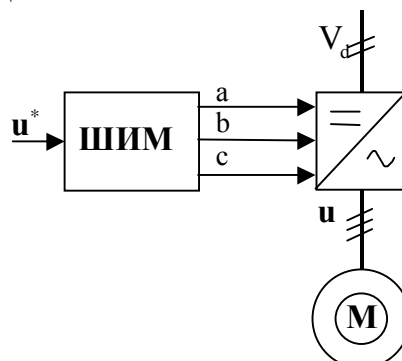


Рис.1. Структурная схема генерирования ШИМ.

Дискретный аналог непрерывной ШИМ получается в результате сравнения регулярно дискретизированного входного сигнала и треугольного модулирующего сигнала, также сформированного в цифровом виде, имеющего период постоянной длительности, с заданным напряжением в каждой из фаз. В течение полупериода $T_0 = 1/2 \cdot f_s$, где f_s – частота ШИМ, во всех фазах напряжение меняет полярность только один раз. Этот метод использует общее несущее напряжение для каждой из трех фаз, как это показано на блок-схеме формирования ШИМ, Рис. 2.

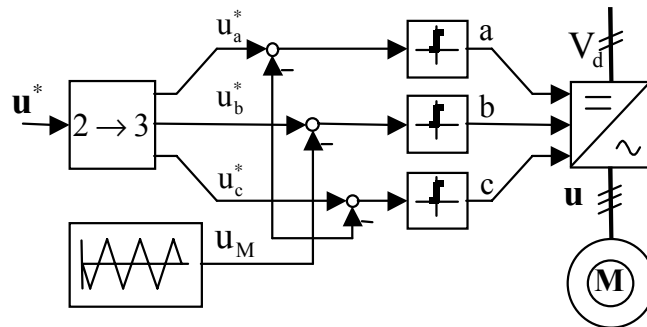


Рис. 2. Блок-схема формирования трехфазной скалярной ШИМ.

Три компаратора сравнивают заданные напряжения для каждой из фаз с треугольным несущим напряжением u_M . Пока заданное напряжение меньше несущего, на выходе компаратора 0, при превышении заданного напряжения над несущим, выход компаратора изменяет свое состояние на 1. Выходы компараторов a, b, c – это управляющие сигналы для транзисторов находящихся в плечах фаз А, В, С, соответственно, причем значение 1 соответствует замкнутому верхнему ключу, а 0 – нижнему. В итоге на вход инвертора, изображенного на Рис. 3, поступает коммутационная функция заданная вектором переключений $\mathbf{p} = (a, b, c)^T$. Управляющие сигналы a', b', c' , которые подаются на ключи Q_2, Q_4, Q_6 , являются инверсными сигналам к a, b, c.

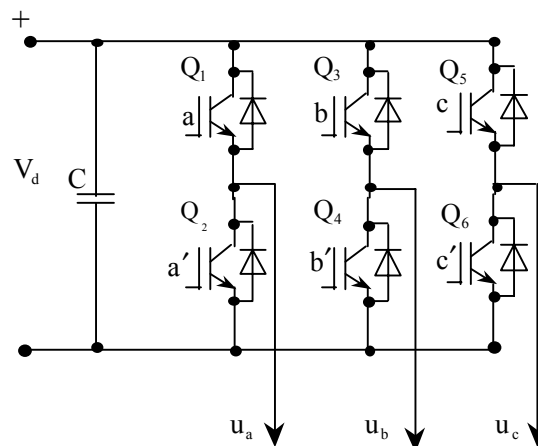


Рис.3. Схема силовой части трехфазного инвертора.

На Рис. 4 показана симметричная система трехфазных заданных напряжений и треугольное несущее напряжение для двух коэффициентов модуляции.

На Рис. 5 показана методика определения моментов коммутации в трехфазной ШИМ в течении двух полупериодов T_0 . Следует обратить внимание, что трехфазные потенциалы u_a, u_b, u_c имеют равную величину в начале и в конце каждого полупериода. Линейные напряжения между фазами, в этом случае, равны нулю.

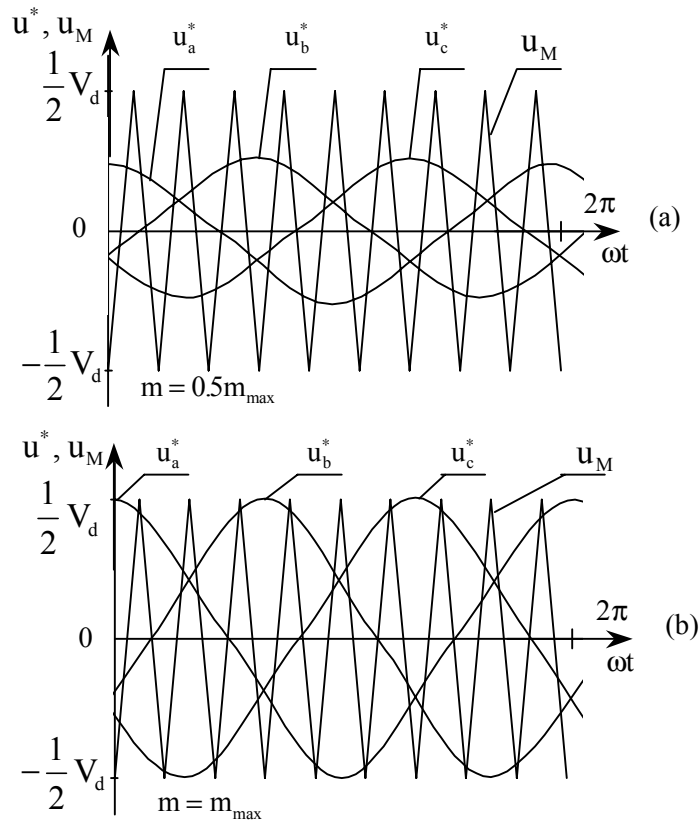


Рис. 4. Несущее треугольное напряжение и сигналы задания при коэффициентах модуляции (а) - $m=0.5 \cdot m_{max}$, (б) - $m=m_{max}$.

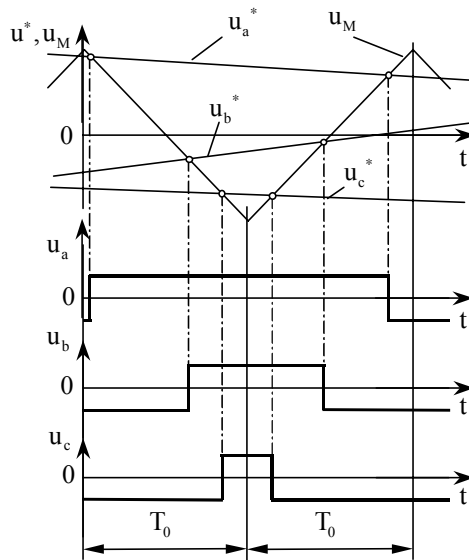


Рис. 5. Определение моментов коммутации при трехфазной скалярной ШИМ.

Существует два метода квантования по времени при формировании ШИМ: симметричный и не симметричный. В случае симметричного – измерение заданного напряжения осуществляется один раз за период $T = 2 \cdot T_0 = 1/f_s$, в моменты времени t_{Sn} , как показано на Рис.6. Треугольный несущий сигнал, показанный пунктиром на Рис. 6, не существует как физический сигнал. Интервалы времени T_1 и T_2 , которые определяют моменты переключения, просто вычисляются в реальном времени из дискретизированных значений $u_a^*(t_{Sn})$, используя геометрические отношения

$$T_1 = \frac{1}{2} \cdot T_0 \cdot [1 + u_a^*(t_{Sn})] \quad (1)$$

$$T_2 = T_0 + \frac{1}{2} \cdot T_0 \cdot [1 - u_a^*(t_{Sn})], \quad n = 1, 2, \dots, \quad (2)$$

с помощью которых могут быть установлены точки равенства несущего сигнала с сигналом задания.

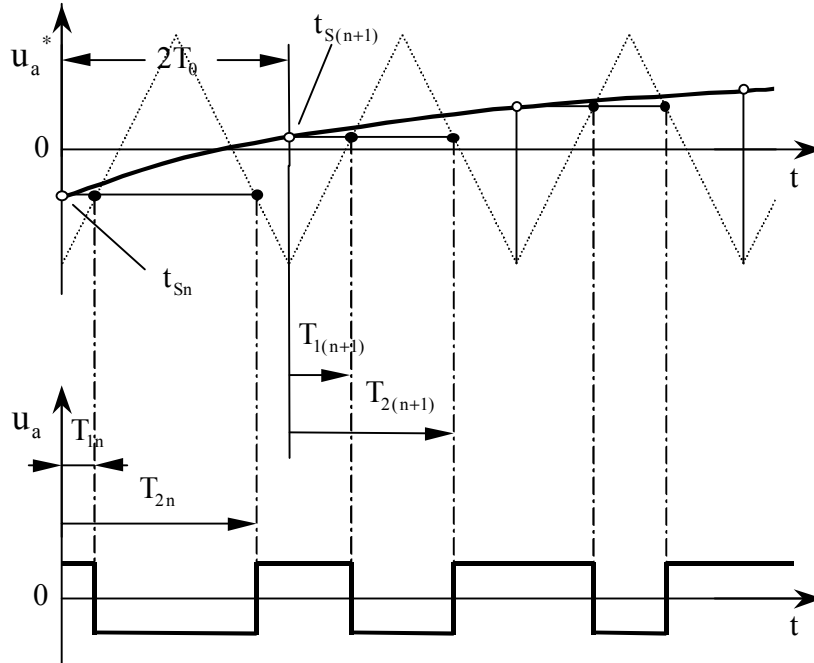


Рис. 6. Симметричная дискретизация.

При асимметричной дискретизации, измерение происходит в моменты времени t_{Sn} с частотой измерения $2 \cdot f_s$, как показано на Рис 7. Удвоенная частота измерения улучшает динамические характеристики и уменьшает искажение токов нагрузки, но в свою очередь требует более быстрой дискретизации задающего напряжения.

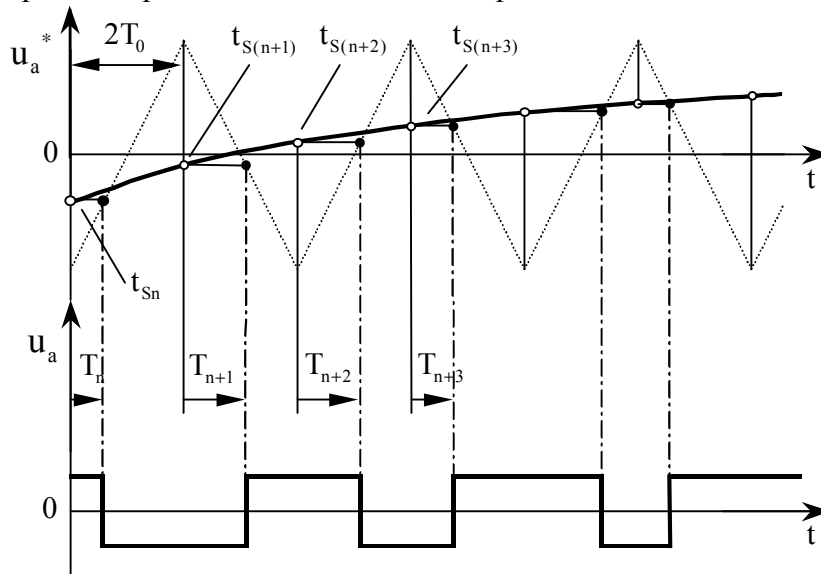


Рис. 7. Асимметричная дискретизация.

В каждом плече в конкретный момент времени может быть включен лишь один ключ. Вектор переключений $\mathbf{p} = (a, b, c)^T$ однозначно определяет выходной вектор линейных напряжений $\mathbf{u}_л = (u_{ab}, u_{bc}, u_{ca})^T$ согласно следующему выражению

$$\mathbf{u}_л = V_d \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix}, \quad (3)$$

Из выражения (3) находится вектор выходного фазного напряжения $\mathbf{u} = (u_a, u_b, u_c)$, где u_a, u_b, u_c напряжения между точками А, В, С инвертора и нейтралью.

$$\mathbf{u} = \frac{1}{3} V_d \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} \quad (4)$$

Регулярно дискретизированная ШИМ представляет собой дискретную аппроксимацию стандартной непрерывной ШИМ, а это не дает возможности полностью использовать все преимущества систем, реализованных на устройствах цифровой техники.