

ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНАЯ МОДУЛЯЦИЯ МЕТОДОМ РЕАЛИЗАЦИИ МГНОВЕННЫХ ФАЗНЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ ДЛЯ ТРЕХФАЗНЫХ ИНВЕРТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ

Анучин А.С.

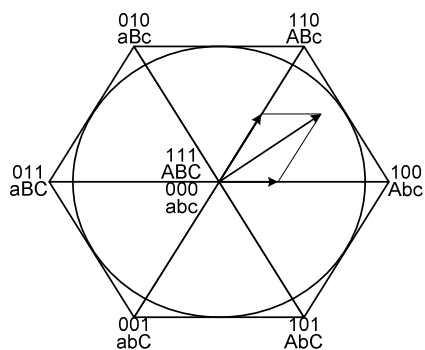
(г. Москва, Московский энергетический институт, Технический Университет)

Аннотация. Рассмотрен способ широтно-импульсной модуляции методом реализации мгновенных фазных потенциалов в сравнении с классической векторной ШИМ для трехфазных инверторов напряжения. Указаны преимущества метода и даны рекомендации по аппаратной реализации компенсатора «мертвого» времени.

Abstract. The novel method of pulse-width modulation technique with implementation of instantaneous phase potentials is considered and compared to space-vector PWM for three-phase voltage DC link inverters. The advantages of this method are shown and recommendations for the hardware implementation of the “dead time” compensation are given.

Векторная широтно-импульсная модуляция базовых векторов является оптимальным методом по использованию запаса напряжения звена постоянного тока [1, 2]. Она применяется практически во всех выпускаемых в настоящее время преобразователях частоты. Первые попытки получить подобие векторной ШИМ заключались в перемодуляции синусоидальной ШИМ. Под перемодуляцией в данном случае подразумевается увеличение вектора напряжения за пределы реализуемых значений, то есть реализация векторов напряжения больших единицы (в относительных величинах). В этом случае первая гармоника выходного напряжения инвертора увеличивает свою амплитуду, но в гармоническом составе появляются 3, 5, 7 и все другие нечетные гармоники из-за того, что в моменты максимумов напряжения фаз выходят на ограничение. Получившиеся «паразитные» нечетные гармоники можно разделить на те, которые оказываются скомпенсированы трехфазной системой напряжений и не отражаются на форме тока, и те, которые создают ток высших гармоник и негативно влияют на энергетику двигателя. Следующая попытка увеличить амплитуду первой гармоники напряжения была предпринята после анализа простой перемодуляции напряжения и оказалось, что добиться существенного (на 15%) увеличения напряжения первой гармоники можно «подмешав» в выходное напряжение все компенсируемые гармоники. В результате получилась ШИМ, идентичная векторной по своим рабочим свойствам и далекая от нее математически.

В векторной ШИМ выделяют восемь возможных состояний инвертора и нумеруют их двоичными цифрами от 000 до 111. Каждый разряд указывает, какой из ключей какой стойки в настоящее время включен. Единице соответствует включенное состояние верхнего ключа стойки и выключенное состояние нижнего, нулю соответствует включенный нижний ключ и отключенный верхний. Графически возможные состояния можно представить в виде шестигранника, показанного на рис.1.



Состояние	100	110	010
Стойка А	Верхний	Верхний	Нижний
Стойка В	Нижний	Верхний	Верхний
Стойка С	Нижний	Нижний	Нижний
Векторная диаграмма напряжений			

Рис.1. Состояния инвертора в режиме векторной ШИМ

Напряжение инвертора формируется перебором указанных состояний. Так, показанный на рис.1. вектор напряжения, можно сформировать двумя способами, выбрав направление обхода по или против часовой стрелки. Если производить обход по часовой стрелке, то первым вектором окажется 110 или ABc (включены верхние ключи фаз А и В и нижний ключ фазы С). В этом состоянии инвертор находится некоторое время, определяющееся проекцией реализуемого вектора на ось фазы С (фазе С принадлежит линия переключения от точки 001 до 110). Затем переключается ключ фазы В и инвертор попадает в состояние 100, где пребывает интервал времени, определяемый проекцией на ось фазы А (фазе А принадлежит горизонтальная линия переключения от 100 до 011). Затем инвертор попадает в нулевое состояние 000, когда фаза А переключается. В этом нулевом состоянии инвертор замыкает фазы двигателя в одну точку, то есть напряжение на двигателе равно нулю. На следующих этапах переключаются ключи фазы А и В, и инвертор проходит состояния в обратной последовательности 100 и 110. Выбирая другое правило обхода базовых векторов, тот же вектор реализуется через состояния $100 \rightarrow 110 \rightarrow 111 \rightarrow 110 \rightarrow 100$. При таком обходе используется другое нулевое состояние 111.

Следует отметить особенности векторной ШИМ:

- За период ШИМ происходит четыре коммутации ключей по сравнению с шестью переключениями в синусоидальной ШИМ, что снижает динамические потери в инверторе.
- Векторная ШИМ максимально полно использует запас напряжения звена постоянного тока, что на 15% больше, чем при синусоидальной ШИМ.
- Для инверторов с бутстрепным питанием драйверов верхних ключей требуется использовать привязку к нижней шине, то есть выбирать такие направления обхода базовых векторов, при котором инвертор использует нулевое состояние 000.

Существует устоявшееся заблуждение, что векторная ШИМ сложнее в реализации, чем синусоидальная и не под силам микроконтроллерам низкой производительности. Это не так, векторная ШИМ требует не больше вычислительных ресурсов, чем синусоидальная. Ей необходим расчет только синуса и косинуса одного угла. Также как и синусоидальная ШИМ, все расчеты скважностей можно реализовывать по предварительно рассчитанным таблицам, если вычислительных мощностей не хватает для вычисления тригонометрических функций в реальном времени (рис.2). Табличным методом векторная ШИМ реализуема на 16-разрядных микроконтроллерах типа i196 и даже на 8-разрядных микроконтроллерах.

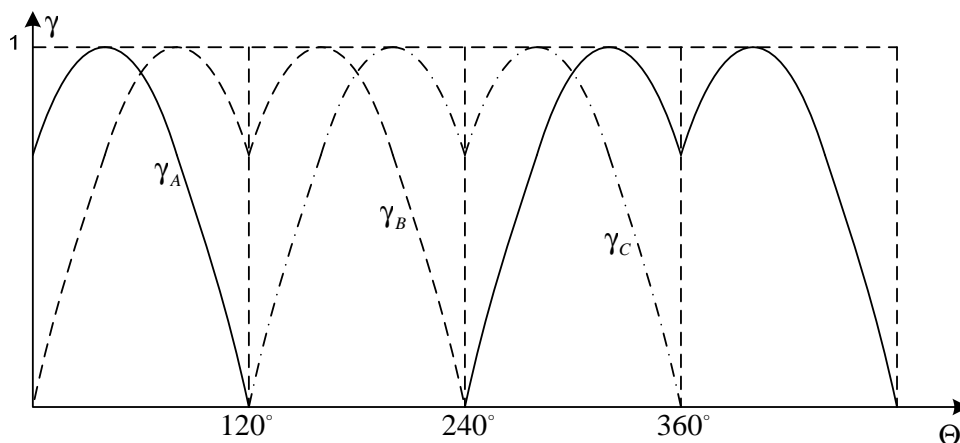


Рис.2. Графики изменения скважностей управления по ключам для табличной реализации векторной ШИМ

Основным недостатком векторной ШИМ является невозможность реализации заданных векторов на границах секторов из-за влияния «мертвого» времени. Это особенно заметно при работе на малых скоростях вращения (малой амплитуде вектора напряжения), когда регуляторы тока сталкиваются с нелинейностью и не могут отработать задание тока.

Для наглядности приведем пример. Если скважность по верхнему ключу фазы близка к нулю, а ток втекает в фазу, то эффективное значение среднего потенциала фазы будет выше заданного, за счет того, что в течении «мертвого» времени ток будет протекать через верхний обратный диод. Таким образом, вектор подходит к границе сектора с «опозданием», то есть по достижению задания потенциала фазы (скважности) нуля, напряжение фазы определяется величиной «мертвого» времени. Если вектор напряжения поворачивается дальше, то происходит смена рабочего сектора (рис.1) на соседний, где эта фаза оказывается полностью выключенной, то есть ее потенциал становится равным нулю относительно минусовой шины звена постоянного тока. Разные авторы предлагают много способов устранения данного скачкообразного изменения потенциала, например, переход к 12-секторной векторной ШИМ [1]. Но проблема остается, так как в этом случае регуляторы тока фаз все равно работают с той же нелинейностью, но уже при другом электрическом угле.

Этот недостаток векторной ШИМ заметен на малых амплитудах напряжения и связан с наличием малых скважностей, что и требовалось исключить в новом методе формирования напряжения. Разработанный метод основан на вывешивании фазных потенциалов между отрицательной и положительной шиной звена постоянного тока. Фазные потенциалы получаются при преобразовании вектора напряжения из полярных координат в систему трехфазных или в системах векторного управления во время обратных фазных преобразований из двухфазной системы в трехфазную. Если ко всем полученным значениям фазных потенциалов прибавить или вычесть константу, то значения линейных напряжений не изменятся, так как они представляют собой разность фазных потенциалов. Необходимая прибавка вычисляется исходя из максимальной разности потенциалов между фазами:

$$\begin{cases} \varphi_{\min} = \min(\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c); \\ \varphi_{\max} = \max(\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c); \\ \varphi_{\Delta} = \frac{U_{DC}}{2} - \left(\frac{\varphi_{\max} - \varphi_{\min}}{2} \right) - \varphi_{\min}; \\ \varphi'_a = \varphi_{\Delta} + \varphi_a; \\ \varphi'_b = \varphi_{\Delta} + \varphi_b; \\ \varphi'_c = \varphi_{\Delta} + \varphi_c, \end{cases}$$

где φ_{\max} – потенциал фазы с максимальным потенциалом, φ_{\min} – потенциал фазы с минимальным потенциалом.

Полученные потенциалы переводятся в скважности по стойкам инвертора с помощью выражения $\gamma = \frac{\varphi'}{U_{DC}}$. Данный метод ШИМ имеет ту же эффективность по использованию напряжения звена постоянного тока, что и векторная ШИМ, но за один период коммутируются все шесть ключей инвертора. Это увеличивает динамические потери в ключах, но система приобретает определенные преимущества.

Вектора напряжения с амплитудой близкой к нулю реализуются при скважности 50%, что обеспечивает линейную зависимость между скважностями и линейными напряжениями двигателя. Нелинейности, как и в случае с синусоидальной и векторной ШИМ, возникает только при смене знака тока фазы, в следствии влияния «мертвого» времени. Борьбаться с этим эффектом можно либо программно, анализируя знак тока, либо на аппаратном уровне [3], используя программируемую логическую матрицу для анализа разницы между задающим сигналом и воспроизведенным инвертором.

В программном случае возникает много проблем с малыми токами и моментом перехода тока через ноль. Как раз в то время, когда система проходит нелинейный участок (переход тока через ноль) информация о знаке тока, используемая для коррекции, исчезает.

В программном случае возникает много проблем с малыми токами и моментом перехода тока через ноль. Как раз в то время, когда система проходит нелинейный участок (переход тока через ноль) информация о знаке тока, используемая для коррекции, исчезает.

Аппаратный компенсатор «мертвого» времени, построенный на базе программируемой логической матрицы, лишен данного недостатка, так как он получает полную информацию о формируемом векторе напряжения с помощью оптронного датчика. Сравнивая сигнал управления с заданием, логика ПЛМ интегрирует ошибку, а затем добавляет ее, увеличивая ширину импульса управления, задерживая задний фронт, либо уменьшает, задерживая передний фронт. Функциональная схема устройства с аппаратным компенсатором «мертвого» времени показана на рис.3.

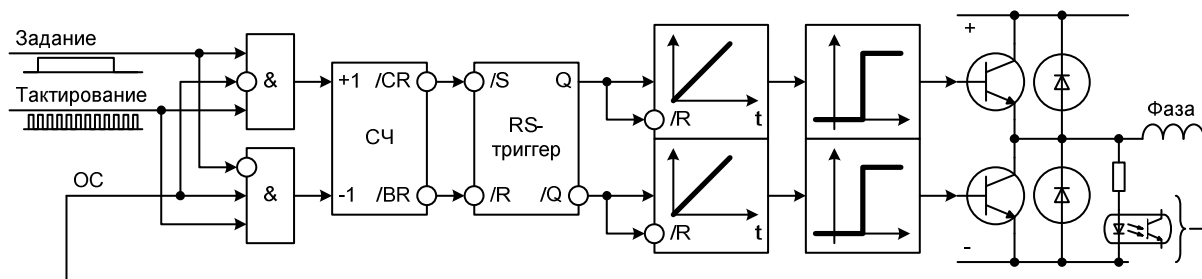


Рис.3. Пример аппаратного компенсатора «мертвого» времени

Предложенный метод ШИМ апробирован в преобразователях частоты серии «iCAN» и планируется его использование в новых версиях преобразователей «Универсал». Работы по аппаратной компенсации «мертвого» времени находятся на стадии лабораторных испытаний, где логика компенсатора выполняется на ПЛМ Xilinx.

Список литературы

1. Чуев П.В. Разработка систем векторного управления асинхронными приводами на базе специализированных сигнальных микроконтроллеров: Дис. на соискание ученой степени кандидата техн. наук. – М.: 2002. – 254 с.
2. Козаченко В.Ф. Основные тенденции развития встроенных систем управления двигателями и требования к микроконтроллерам: CHIP NEWS. – 1999.– №1.– с.2-9
3. Analysis and Compensation of Inverter Non-Idealities, Analog Devices seminar, 1998

Сведения об авторе:



Анучин Алексей Сергеевич, к.т.н., доцент кафедры Автоматизированного электропривода МЭИ (ТУ). Основное направление деятельности – разработка высокопроизводительных микроконтроллерных систем управления. 111250, Москва, ул. Красноказарменная, д. 13, каф. АЭП, тел. (495)-362-70-21, e-mail: anuchinas@mpei.ru