



# Применение регулятора тока нулевой последовательности для векторного управления трехфазным двигателем

ЛАШКЕВИЧ М.М.

При векторном управлении трехфазным двигателем возникает проблема влияния «мертвого» времени инвертора на форму фазных токов. Два регулятора токов по ортогональным осям  $d$  и  $q$  принципиально не могут компенсировать эти искажения. Для решения проблемы предлагается применение дополнительного регулятора тока нулевой последовательности.

Ключевые слова: электропривод, трехфазный двигатель, векторное управление, регулятор тока нулевой последовательности

В ряде случаев для трехфазного регулируемого электропривода переменного тока целесообразно применять инверторы из шести стоек, при этом каждая обмотка двигателя включается в схему полного моста (рис. 1). Такое соединение позволяет повысить напряжение на двигателе, а соответственно, и мощность в 1,7 раза по сравнению с применением классического инвертора (из трех стоек и соединением обмоток в звезду).

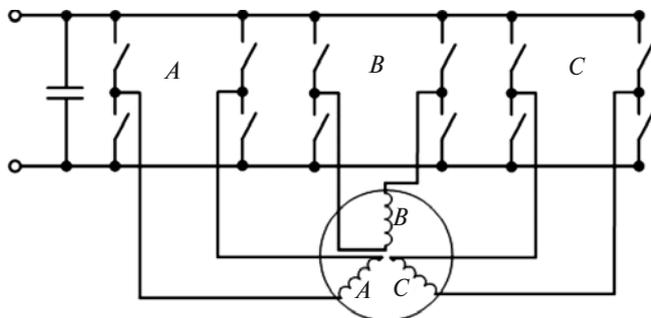


Рис. 1. Инвертор из шести IGBT стоек с подключенным трехфазным двигателем

В статье рассматривается векторное управление трехфазным двигателем с синусоидальной ЭДС при использовании данного инвертора.

**Проблема классического подхода.** Так как векторное управление подразумевает регулирование напряжения на фазах двигателя с помощью ШИМ, необходимо определить его тип. Для данного инвертора могут применяться два основных способа: либо коммутация одной стойки за период ШИМ, либо двух. Поскольку первый способ предпочтительнее с точки зрения потерь в инверторе, используем его в дальнейшем исследовании. Однако такой тип ШИМ при малых напряжениях имеет сильно выраженные искажения за счет влияния «мертвого» времени.

The problem connected with the influence of the inverter «dead time» on the waveform of phase currents arises during vector control of a three-phase motor. Two controllers of currents in the orthogonal axes  $d$  and  $q$  cannot compensate these distortions in principle. For solving the problem, it is proposed to use an additional controller of zero-sequence current.

Key words: electric drive, three-phase motor, vector control, zero-sequence current controller

Практические испытания проходили на стенде, включающем инвертор, собранный по схеме рис. 1, вентиляльно-индукторный двигатель мощностью 2,2 кВт с внешним возбуждением (с точки зрения управления – синхронная машина с активным моментом), а также систему управления на базе сигнального микроконтроллера TI TMS320F2810. На первом этапе испытаний была использована классическая система векторного датчикового управления [2] с двумя регуляторами токов статора по осям  $d$  и  $q$ . На осциллограмме рис. 2 показаны токи статора  $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$  при работе такой замкнутой по току системы управления на низкой (вблизи нуля) скорости (частота тока 4 Гц, прикладываемое напряжение около 0,2% номинального). Кроме того, на осциллограмме показан вычисленный ток нулевой последовательности  $I_0$ . Даже без применения специальных методов анализа видно, что форма тока далека от желаемой синусоидальной, искажения значительны, а сумма токов фаз не равна нулю (протекают токи нулевой последовательности).

Исследованиями подтверждено предположение, что данные искажения токов вызваны влиянием

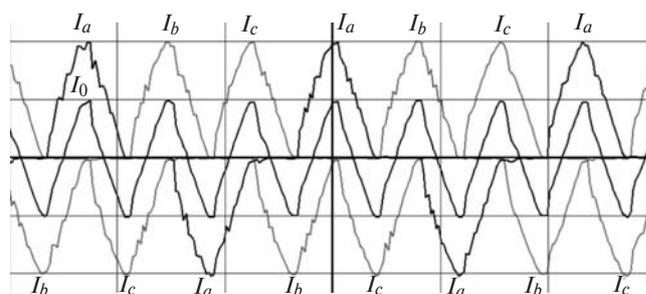


Рис. 2. Осциллограммы токов статора  $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$  и тока нулевой последовательности  $I_0$  при работе классической замкнутой по току системы управления на низкой скорости

«мертвого» времени», при изменении которого значение искажений токов пропорционально менялось. В классическом инверторе искажения «мертвого» времени также имеют место, однако компенсируются двумя регуляторами тока статора. Из-за отсутствия напряжения нулевой последовательности возможны взаимные преобразования между трехфазной и двухфазной системами координат без потери информации. В рассматриваемом случае искажения не могли быть полностью скомпенсированы, так как в данном инверторе возможно самопроизвольное появление напряжения нулевой последовательности (например, положительное напряжение в одной фазе и нулевые в других), вызванное влиянием «мертвого» времени. Два регулятора в декартовых осях координат не могли его компенсировать, так как при преобразовании из трехфазной системы координат в двухфазную не была учтена информация о токах нулевой последовательности.

**Решение проблемы введением дополнительного регулятора.** Было решено применить дополнительно регулятор тока нулевой последовательности, а в модуле ШИМ, управляющем инвертором, предусмотреть дополнительный канал воздействия для регулирования напряжения нулевой последовательности (рис. 3).

Большая часть системы управления функционирует во вращающейся системе координат (декартовой), жестко связанной с ротором двигателя. Она имеет две оси —  $d$ , ориентированную по потоку ротора, и  $q$ , перпендикулярную ей. Ток по оси  $q$  создает момент двигателя. Так как возбуждение двигателя внешнее, ток по оси возбуждения  $d$  задается

равным нулю. Для преобразования от статических осей координат  $a$  и  $b$ , связанных с обмотками статора и неподвижных, к осям  $d$  и  $q$  служат блоки координатных преобразований  $БКП-1$  и  $БКП-2$ .

Задание тока  $i_{a\_зад}^*$ , формирующего момент двигателя, попадает на сумматор ПИ-регулятора тока по оси  $q$  ( $PT-q$ ), выходом которого (регулятора) является задание напряжения по оси  $q$ . Аналогично функционирует регулятор тока по ортогональной оси  $d$  ( $PT-d$ ), задание тока на входе которого нулевое.

Напряжения с регуляторов токов поступают на  $БКП-1$  (поворот системы координат на угол  $\varphi$ ), а затем на инвертор напряжения. Измеренные значения токов фаз двигателя  $i_a^*$ ,  $i_b^*$ ,  $i_c^*$  поступают на вход блока фазных преобразований  $БФП$ , в котором преобразуются из трехфазной системы координат в двухфазную декартовую с дополнительным выделением токов нулевой последовательности  $a$ ,  $b$ ,  $0$ . Токи  $i_{sa}^*$ ,  $i_{sb}^*$  поступают на блок координатных преобразований  $БКП-2$ , «поворачивающий» систему координат на угол  $\varphi$ . На выходе  $БКП-2$  имеем фактические значения токов в системе координат  $d$ ,  $q$ , ориентированной по потокосцеплению ротора. Эти значения используются в качестве сигналов обратных связей на входах регуляторов токов по осям  $d$ ,  $q$ .

Отличием данной структуры от классической является наличие, во-первых, регулятора тока нулевой последовательности  $PT-0$ , а во-вторых, модуля ШИМ, позволяющего отработать задание нулевой последовательности. Ток нулевой последовательности

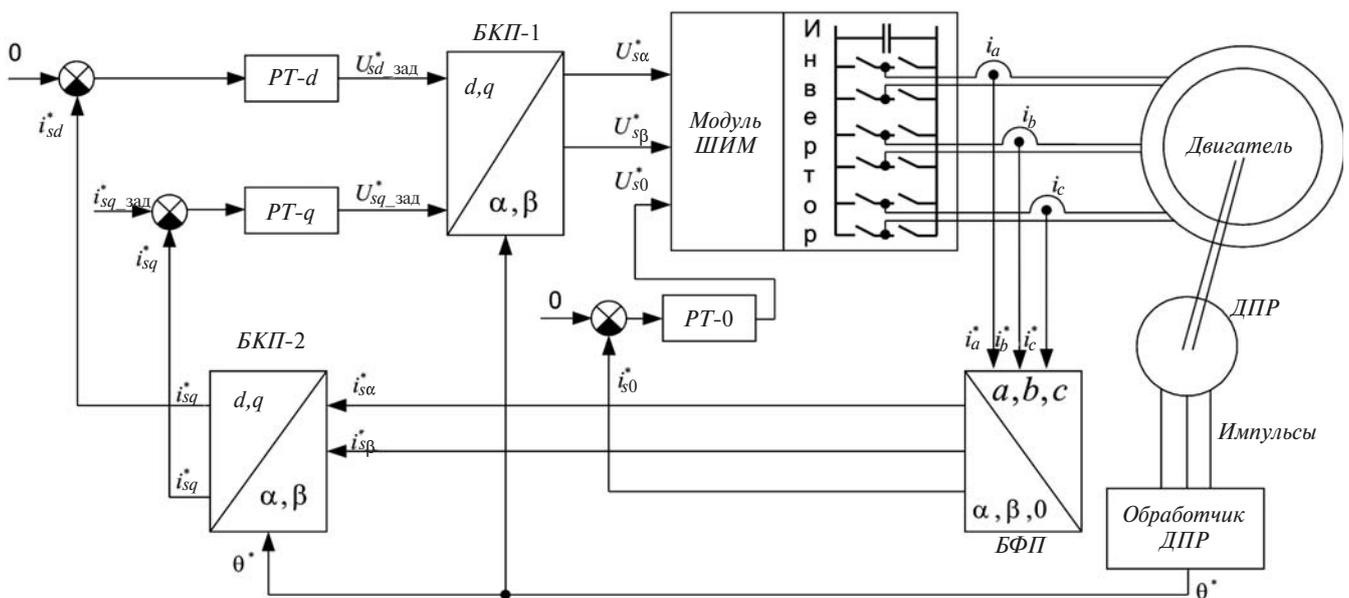


Рис. 3. Структурная схема векторной датчиковой системы управления синхронной машиной с дополнительным регулятором нулевой последовательности

тельности  $i_{s0}^*$  поступает на сумматор регулятора тока нулевой последовательности  $PT-0$ . На выходе регулятора вырабатывается задание напряжения нулевой последовательности, которое поступает на модуль ШИМ, управляющий ключами инвертора и осуществляющий фазные преобразования, обратные тем, которые происходят в БФП, т.е. вместо заданий напряжения  $U_{sa}^*, U_{sb}^*, U_{s0}^*$  получает задания по трем фазам  $U_{sa}^*, U_{sb}^*, U_{sc}^*$ , которые затем воспроизводятся на мостовых схемах инвертора. Математическое представление выражений для блоков БФП и БКП может быть найдено в [1]. Фазные преобразования должны осуществляться по полным формулам, учитывающим нулевую последовательность:

$$x_{1a} = \sqrt{\frac{2\alpha}{3\beta}} x_{1a} - \frac{1}{2} x_{1b} - \frac{1}{2} x_{1c} \frac{\ddot{\theta}}{\omega}$$

$$x_{1b} = \sqrt{\frac{2\alpha\sqrt{3}}{3\beta}} x_{1b} - \frac{\sqrt{3}}{2} x_{1c} \frac{\ddot{\theta}}{\omega}$$

$$x_{10} = \sqrt{\frac{2\alpha\sqrt{2}}{3\beta}} x_{1a} + \frac{\sqrt{2}}{2} x_{1b} + \frac{\sqrt{2}}{2} x_{1c} \frac{\ddot{\theta}}{\omega}$$

$$x_{1a} = \sqrt{\frac{2\alpha}{3\beta}} x_{1a} + \frac{\sqrt{2}}{2} x_{10} \frac{\ddot{\theta}}{\omega}$$

$$x_{1b} = \sqrt{\frac{2\alpha}{3\beta}} \frac{1}{2} x_{1a} + \frac{\sqrt{3}}{2} x_{1b} + \frac{\sqrt{2}}{2} x_{10} \frac{\ddot{\theta}}{\omega}$$

$$x_{1c} = \sqrt{\frac{2\alpha}{3\beta}} \frac{1}{2} x_{1a} - \frac{\sqrt{3}}{2} x_{1b} + \frac{\sqrt{2}}{2} x_{10} \frac{\ddot{\theta}}{\omega}$$

Работа системы управления с тремя регуляторами тока представлена на рис. 4. Частота вращения и режим работы двигателя аналогичны тем, при которых снималась осциллограмма рис. 3, но за

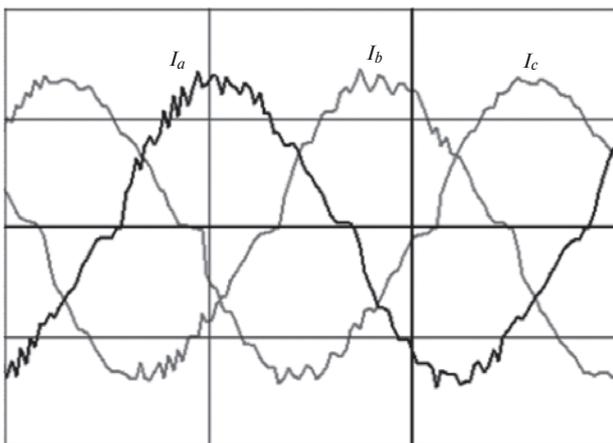


Рис. 4. Осциллограммы токов статора при работе замкнутой по току системы управления на низкой скорости с регулятором нулевой последовательности

счет действия регулятора тока нулевой последовательности форма токов близка к синусоидальной. Кроме улучшения гармонического состава, снижены также омические потери и потери в ключах инвертора за счет уменьшения амплитуды протекающих токов в фазах (без изменения амплитуды суммарного вектора тока).

С повышением частоты вращения двигателя и соответствующим увеличением ЭДС, а значит и прикладываемого напряжения, влияние «мертвого» времени инвертора уменьшается. Так, на частоте тока 60 Гц и напряжении 4% номинального влияние искажений значительно уменьшено, и даже без регулятора нулевой последовательности гармонический состав улучшается (рис. 5).

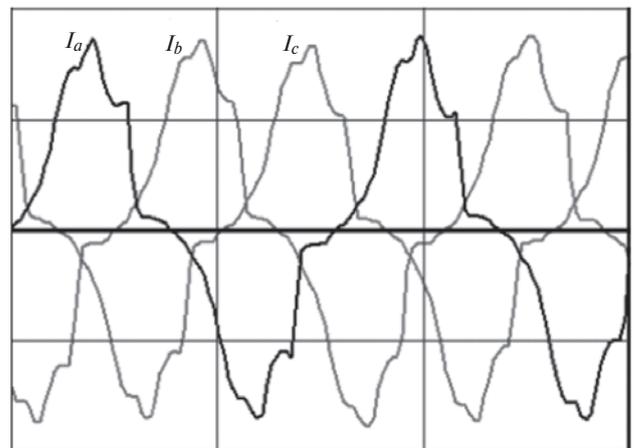


Рис. 5. Осциллограммы токов статора при работе замкнутой по току системы управления на частоте 60 Гц без регулятора нулевой последовательности

Наличие регулятора нулевой последовательности на такой частоте не вносит заметного улучшения, так как пропускной способности контура этого регулятора не хватает (в данном конкретном случае) для полной компенсации высокочастотных гармоник искажений, вызванных влиянием «мертвого» времени. С дальнейшим разгоном двигателя (частота тока 340 Гц, напряжение 23% номинального) влияние «мертвого» времени практически незаметно и уменьшается с дальнейшим разгоном, включение регулятора нулевой последовательности не отражается на форме тока.

Таким образом, введение регулятора нулевой последовательности необходимо: при раздельном управлении фазами; числе фаз, большем двух; значительных искажениях напряжения, вызванных влиянием «мертвого» времени; работе привода на низких скоростях с малым напряжением и большой нагрузкой.

Перечисленные условия введения регулятора нулевой последовательности касаются в основном транспортного применения электроприводов

(например при движении в гору на низкой скорости), а также класса сервоприводов.

---

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

---

1. **Ключев В.И.** Теория электропривода: Учебник. для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1998.

2. **Козаченко В.Ф., Анучин А.С., Жарков А.А., Дроздов А.В.** Цифровое векторное управление вентильно-индукторными двигателями с независимым возбуждением. — Компоненты и технологии, 2004, № 8.

[23.04.12]

*Автор: Лашкевич Максим Михайлович окончил в 2009 г. кафедру автоматизированного электропривода Московского энергетического института. Аспирант кафедры. С 2007 г. инженер-программист ООО «НПФ Вектор».*