

ИМПУЛЬСНЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ ТОКА В ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ИМПУЛЬСНО-ВЕКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ*

Ю.С. Усынин, А.В. Валов, Т.А. Козина
г. Челябинск, Южно-Уральский государственный университет

IMPULSE CURRENT REGULATORS IN AC ELECTRIC DRIVE WITH IMPULSE-VECTORIAL CONTROL

Yu.S. Usynin, A.V. Valov, T.A. Kozina
Chelyabinsk, South Ural State University

Показана целесообразность применения в электроприводах переменного тока с импульсно-векторным управлением импульсных регуляторов тока, изменяющих свои свойства при переменных скоростях вращения.

Ключевые слова: импульсно-векторное управление, синхронные двигатели, импульсные регуляторы, псевдочастотные характеристики.

The applying expediency of impulse current regulators with properties variation depending on rotation speed in AC (synchronous) electric drive with impulse-vectorial control is shown in the article.

Keywords: impulse-vectorial control, synchronous motors, impulse regulators, pseudofrequency characteristics.

Введение. Есть схемы импульсно-векторного управления [2, 4, 5], которые характеризуются малыми затратами и неплохой энергетикой, но попытка применить для них привычные замкнутые системы управления не дает желаемых результатов. Это связано с импульсным режимом работы данных приводов и меняющейся от скорости переменной частотой квантования импульсов момента. В статье рассмотрены импульсные регуляторы тока и показана их эффективность в синхронных электроприводах с импульсно-векторным управлением.

Функциональная схема синхронного электропривода с импульсно-векторным управлением может быть выполнена в двух вариантах. В первом случае (рис. 1) в цепь трехфазной обмотки статора включен тиристорный коммутатор ТК, выполненный по мостовой трехфазной схеме, в замкнутую накоротко выходную цепь постоянного тока которого включен датчик тока ДТ.

Система управления электроприводом СУ обеспечивает, во-первых, поддержание тока статора, соответствующего сигналу $u_{\text{ЗАД}}$, а во-вторых, сопоставляя сигналы с выхода блока определения положения обобщенного вектора напряжения сети БОП \vec{U}_c и с датчика положения индуктора ДПИ,

разрешает коммутатору открывать пару тириستоров, принадлежащих разным группам коммутатора, только в те периоды времени, которые соответствуют двигателю моменту синхронного двигателя СД.

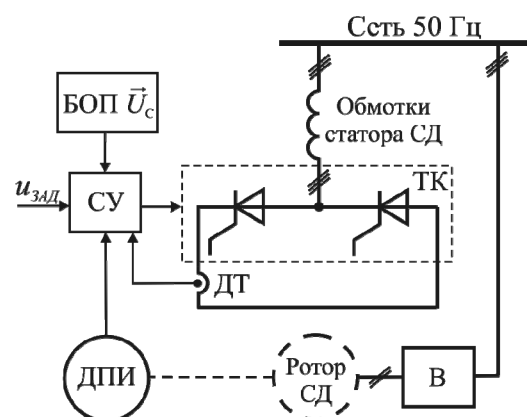


Рис. 1. Функциональная схема импульсно-векторного управления синхронным двигателем с тиристорным коммутатором ТК: ДПИ – датчик положения индуктора, ДТ – датчик тока, СУ – система управления, БОП \vec{U}_c – блок определения положения обобщенного вектора напряжения сети, В – возбудитель

* Работа проводится в рамках реализации Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы по проблеме «Высоконадежные энергосберегающие комплексы на основе новых типов вентильных электроприводов и обеспечение их безопасности», конкурс НК 637П.

Возбудитель В, подключенный к обмотке ротора СД, обеспечивает постоянный ток как при разгоне привода, так и в установившемся режиме работы.

По такому же принципу может работать и асинхронный двигатель с фазным ротором, переведенный в синхронный режим [4, 5].

Другая схема импульсно-векторного управления СД [2] отличается лишь элементной базой силовых цепей статора: вместо тиристорного коммутатора ТК включен диодный мост ДМ, а ток через обмотку статора регулируется транзисторным ключом КТ (рис. 2).

В импульсно-векторных системах управления создаваемый момент носит импульсный характер с переменной, зависящей от скорости частотой. Непрерывные регуляторы тока не могут приспособляться к переменной частоте следования импульсов тока статора, связанной с изменением скорости, а это требует применения адаптивных импульсных регуляторов.

Импульсный регулятор тока в системе импульсно-векторного управления синхронным двигателем с тиристорным коммутатором представлен на рис. 3. В обратной связи импульсного регулятора имеется ключ, который закорачивает конденсатор регулятора C_{OC} и устанавливает нулевые начальные значения по сигналу запрета работы регулятора $U_{ЗАПР}$ [4].

Временные диаграммы непрерывного и импульсного регуляторов тока в схеме импульсно-векторного управления синхронным двигателем представлены на рис. 4, а, б.

Предположим, что нужное значение тока статора устанавливается подачей отпирающего импульса $U_{УПР}$, сдвинутого во времени относительно напряжения сети $U_{СЕТИ}$ на величину t_1-t_0 . При использовании непрерывного пропорционально-интегрального (ПИ) регулятора тока в момент времени t_1 скачком подается задание $U_{ЗТ}$ на регулятор тока, а конденсатор C_{OC} ПИ-регулятора тока заряжается. Когда напряжение $U_{РТ}$ на выходе ре-

гулятора становится равным напряжению открытия тиристоров, открывается пара тиристоров, принадлежащих разным группам коммутатора, и ток начинает протекать по соответствующей цепи. В период времени от t_2 до t_3 (рис. 4, а) напряжение сети отрицательно, векторы МДС якоря и индуктора создают тормозной момент, тиристоры закрыты, а сигнал с датчика тока равен нулю $U_{ДТ} = 0$. Но задание регулятора тока по-прежнему положительно и пропорционально $U_{ЗТ}$, поэтому конденсатор продолжает заряжаться до напряжения питания операционного усилителя. В результате на выходе регулятора тока формируется максимальное значение $U_{РТ}$, превышающее напряжение открытия тиристоров. Поэтому, когда напряжение сети снова становится положительным (момент t_3 , рис. 4, а), отпирающий импульс соответствует положительной полуволне напряжения (отрезок $t_3 - t_4$), тиристоры открываются с нулевым углом. В результате тиристорный коммутатор теряет управляемость, а ток в силовой цепи поддерживается максимальным. Данную ситуацию легко исправить, если обнулять напряжение на конденсаторе в отрицательные полупериоды питающего напряжения. Для этого необходимо закорачивать конденсатор в те моменты времени, когда ему не следует заряжаться.

Временные диаграммы СД с импульсно-векторным управлением и импульсным регулятором тока представлены на рис. 4, б. От предыдущего случая они отличаются наличием времени задержки Δt подачи отпирающих импульсов. Эта задержка появляется благодаря тому, что в отрицательные полупериоды t_2-t_3 питающего напряжения регулятор тока РТ обнуляется.

Итак, работу импульсного регулятора тока (см. рис. 3) можно разбить на два участка: первый участок, когда ключ ИЭ1 в обратной связи регулятора тока разомкнут; второй, когда ключ замкнут. На первом участке регулятор ведет себя как обычный непрерывный ПИ-регулятор, на втором – закорочен и на выходе дает ноль.

Чтобы исследовать свойства регулятора в

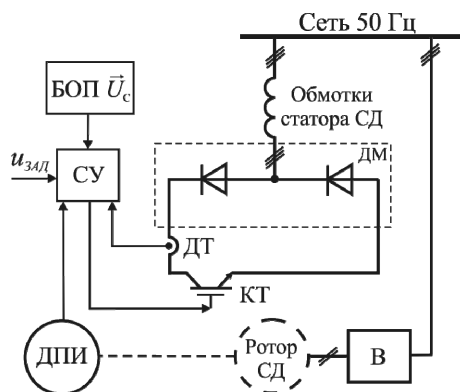


Рис. 2. Функциональная схема импульсно-векторного управления синхронным двигателем с диодным мостом: КТ – ключ транзисторный; ДМ – диодный мост

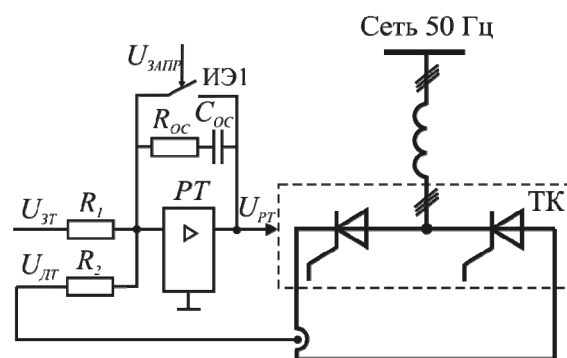


Рис. 3. Импульсный регулятор тока в схеме импульсно-векторного управления синхронным двигателем с тиристорным коммутатором

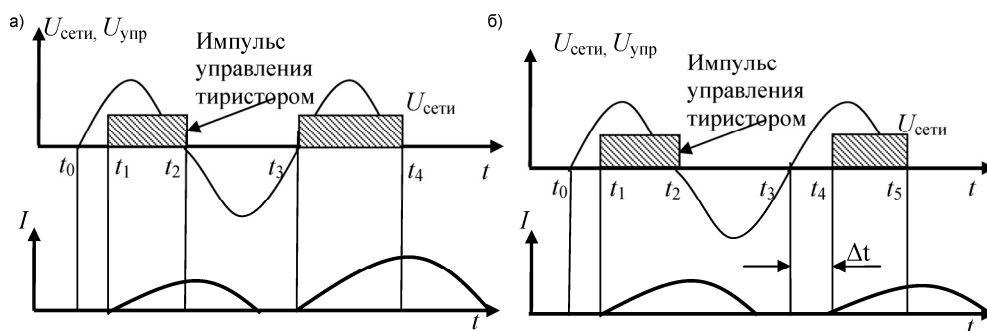


Рис. 4. Осциллограммы работы ПИ-регулятора тока: а – непрерывного; б – импульсного

«большом», т. е. на протяжении нескольких периодов работы регулятора в системе импульсно-векторного управления, целесообразно применить аппарат псевдочастотных характеристик [1]. Суть данного метода заключается в том, что циклическую частоту сигнала ω , используемую для построения частотных характеристик, заменяют на псевдочастоту:

$$\lambda = 2/T,$$

где $T = \frac{2\pi}{\omega}$ – период квантования импульсной системы.

Структурная схема контура тока с импульсным регулятором тока приведена на рис. 5. Здесь ЯЦ – эквивалент электрической цепи якоря синхронного двигателя, который можно выразить аperiodическим звеном; ТК – тиристорный коммутатор, который для простоты рассуждений заменялся простым пропорциональным звеном; ДТ – датчик тока, коэффициент пропорциональности которого принимался равным единице; РТ – непрерывный ПИ-регулятор тока. Элементы ИЭ1 и ИЭ2, изображенные в виде контактов, отражают прерывистый характер протекания тока в цепи якоря: ИЭ1 характеризует импульсный режим работы регулятора тока; ИЭ2 учитывает однополупериодный режим выпрямления напряжения питающей сети тиристорным коммутатором.

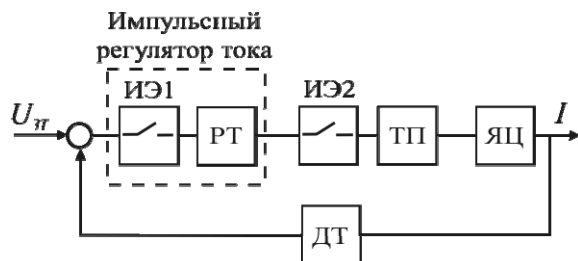


Рис. 5. Структурная схема контура тока с импульсным регулятором тока

В импульсно-векторной схеме частота квантования импульсных элементов переменна и зависит от скорости вращения двигателя, поэтому был произведен расчет для трех фиксированных скоростей (10, 40, 100 рад/с), для каждой из которых период

квантования импульсного элемента ИЭ2 можно принять постоянным. Так как рассматриваемая система импульсная, то накладываются два дополнительных условия (по [1]): 1) «хвост» частотной характеристики всегда должен быть ниже прямой $\lg(M/(M+1))$, где M – показатель колебательности нескорректированной импульсной системы; 2) частота среза замкнутой системы должна быть меньше чем $2/T$. Псевдочастотные характеристики контура регулирования тока системы импульсно-векторного управления синхронным двигателем представлены на рис. 6, где на графиках изображены псевдочастотные характеристики разомкнутой нескорректированной системы (кривые 1) и желаемые псевдочастотные характеристики разомкнутой скорректированной системы (кривые 2).

Характеристики нескорректированной системы (кривые 1) имеют следующие особенности: их псевдочастота среза больше псевдочастоты $2/T$; высокочастотный «хвост» лежит выше прямой $M/(M+1)$. В результате нескорректированная импульсная система неустойчива и испытывает незатухающие колебания. Желаемые псевдочастотные характеристики разомкнутой скорректированной системы имеют следующие особенности: они должны пересекать ось абсцисс при псевдочастоте $\lambda_{cp} < 2/T$; высокочастотный «хвост» должен лежать ниже прямой $M/(M+1)$ и стремиться к бесконечности при приближении псевдочастоты λ к нулю. Такая характеристика соответствует астатической устойчивой системе.

Получение желаемой характеристики РТ достигается выбором типа регулятора и его параметров так, чтобы псевдочастотная характеристика разомкнутой нескорректированной системы (кривая 1) приняла вид желаемой (кривая 2). Импульсный регулятор тока является последовательным корректирующим устройством с передаточной функцией $W_k(p) = (1+T_1p)/T_2p$. Параметры T_1 и T_2 следует подбирать таким образом, чтобы псевдочастотная характеристика произведения звеньев $W_k(p)$ и $W(p)$ совпадала с желаемой псевдочастотной характеристикой.

Заключение. В синхронном электроприводе с импульсно-векторной системой управления момент

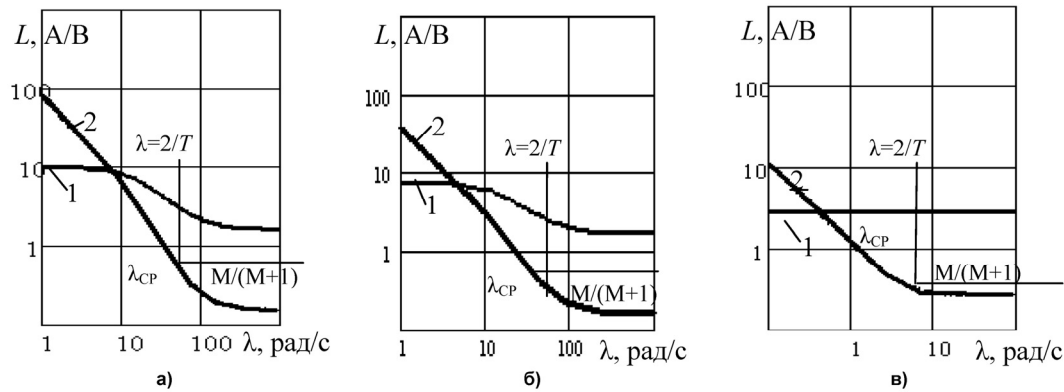


Рис. 6. Псевдочастотные характеристики контура регулирования тока КРТ при скоростях вращения:
а) $\omega = 10$ рад/с; б) $\omega = 40$ рад/с; в) $\omega = 100$ рад/с

носит прерывистый характер с переменной, зависящей от скорости частотой квантования. Непрерывные регуляторы тока не могут приспособляться к изменениям скорости, поэтому в данных электроприводах целесообразно применять импульсные регуляторы с переменной частотой квантования. Свойства такого регулятора подобны свойствам непрерывного регулятора для частот меньших половины частоты квантования. Так как в импульсных регуляторах тока параметры регулятора подстраиваются под изменяющиеся свойства системы, то они дают лучшие показатели процессов регулирования по сравнению с непрерывными регуляторами.

Литература

1. Бесекерский, В.А. *Динамический синтез систем автоматического регулирования* / В.А. Бесекерский. – М.: Наука, 1970. – 576 с.
2. Давыдкин, М.Н. *Векторно-импульсный способ плавного пуска синхронных электродвигателей*: автореф. дис. ... канд. техн. наук / М.Н. Давыдкин. – Магнитогорск, 2010. – 16 с.

3. Джурри, Э. *Импульсные системы автоматического регулирования* / Э. Джурри; пер. с англ. М.А. Берманта, Ж.Л. Грина; под ред. Я.З. Цыпкина. – М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1963. – 453 с.

4. Пат. № 2337466 Российская Федерация, МПК H02P 27/05. *Асинхронный электропривод с фазным ротором* / Ю.С. Усынин, А.В. Валов, С.А. Чупин. – Заявл. 09.07.2007; опублик. 27.10.2008, Бюл. № 30.

5. Усынин, Ю.С. *Асинхронный электропривод с импульсно-векторным управлением* / Ю.С. Усынин, А.В. Валов, Т.А. Козина // *Электротехника*. – 2011. – № 3. – С. 15–19.

6. Цытович, Л.И. *Элементы аналоговой и цифровой электроники в автоматизированном электроприводе: учебник для вузов* / Л.И. Цытович. – Челябинск: ЮУрГУ, 2001. – С. 37.

Поступила в редакцию 18.09.2011 г.

Усынин Юрий Семёнович – докт. техн. наук, профессор кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск. Область научных интересов – металлургический, общепромышленный, автономный, следящий электроприводы. Контактный телефон: 8 (351) 267-93-21.

Usynin Yury Semenovich – a Doctor of Science (Engineering), Professor of the Electric Drive and Automation of Industrial-Scale Plant Department of South Ural State University, Chelyabinsk. Research interests: metallurgic, industrial, single motorized and follow up electric drives. Tel.: 8 (351) 267-93-21.

Валов Артем Владимирович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск. Область научных интересов – микропроцессорные системы управления электроприводов. Контактный телефон: 8 (351) 267-93-21.

Valov Artyom Vladimirovich – Candidate of Science (Engineering), an associate professor of the Electric Drive and Automation of Industrial-Scale Plant Department of South Ural State University, Chelyabinsk. Research interests: microprocessor control system of electric drives. Tel.: 8 (351) 267-93-21.

Козина Татьяна Андреевна – аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск. Область научных интересов – системы импульсно-векторного управления, бездатчиковый электропривод. Контактный телефон: 8 (351) 267-93-21.

Kozina Tatyana Andreevna – a post-graduate student of the Electric Drive and Automation of Industrial-Scale Plant Department of South Ural State University, Chelyabinsk. Research interests: systems of impulse-vector control, sensorless electric drive. Tel.: 8 (351) 267-93-21.