

Об управлении моментом исполнительного двигателя в электроприводах

КАРЖАВОВ Б.Н.

Сформулированы характерные особенности построения электроприводов, построенных на основе частотно-токового управления и на базе вентильных схем. Приведены схемы основных узлов и даны примеры наиболее рационального использования таких электроприводов в различных системах управления.

Ключевые слова: электропривод, управление моментом, частотно-токовое управление, вентильный привод

Электроприводы (ЭП) с управлением моментом исполнительного двигателя (ИД) благодаря своим известным положительным качествам (в основном высокой надежности и быстродействию) находят все большее применение в промышленности и специализированных системах управления [1, 3]. Часто в таких приводах для понижения степени передаточной функции и придания необходимой жесткости выходной характеристике применяют синхронный генератор (СГ) [2].

Отметим, что управление моментом, в частности для приводов переменного тока, известно достаточно давно – с момента предложенного в 60-х годах частотно-токового управления (ЧТУ) [4]. Однако в опубликованных работах, посвященных разработкам ЭП с управлением моментом, некорректно используются устоявшиеся термины, в частности ЧТУ, что отмечалось в статье В.Н. Бродовского и Е.С. Иванова (см. «Электричество» 2009, № 9). В настоящей статье делается попытка сформулировать основные особенности разных схем, входящих в класс ЭП с управлением моментом ИД, а именно, схем с использованием ЧТУ и построенных на базе вентильных приводов (ВП) [5].

Термин «управлением моментом» – обобщенное название способа управления ИД в ЭП, заключающегося в регулировании тока якоря ИД при поддержании максимально возможного для данного значения тока электромагнитного момента [3], что обеспечивается при ортогональности векторов магнитного потока и результирующего тока якоря в ИД. В ИД постоянного тока эту операцию выполняет коллектор (являющийся одновременно и коммутатором тока питания, и датчиком положения (ДП) ротора), а в ИД переменного тока в качестве ДП используется либо электромеханический датчик угла (типа СКВТ) с аналоговым выходом, либо электрический ДП, построенный на дискрет-

The characteristic features of electric drives constructed on the basis of frequency-current control and power switches are formulated. Circuit diagrams of the main components are presented, and examples of the most rational use of such electric drives in different control systems are given.

Key words: electric drive, torque control, frequency-current control, inverter-fed drive

ных элементах, например на микросхемах с датчиками Холла или оптическими. Иногда для определения положения потока используется сигнал, пропорциональный интегралу от ЭДС ИД (или СГ [6], если он есть в приводе).

Однако чаще всего применяют комбинацию двух сигналов – выходного напряжения ДП $U_{ДП} = k_{\alpha} \alpha$ и напряжения, пропорционального ЭДС $U_{\Omega} = k_{\Omega} \Omega = k_{\Omega} p \alpha$, которые в определенном соотношении подают на вход сглаживающего фильтра с постоянной времени $T_{\Phi} = \frac{k_{\Omega}}{k_{\alpha}}$ [7]. В этом слу-

чае сдвиг фаз, вносимый фильтром, компенсируется опережающим сигналом ЭДС, и напряжение на выходе фильтра $U_{\Phi} = k_{\alpha} \alpha$ формируется без помех и запаздывания по фазе.

Отметим, что по этому же принципу (т.е. с использованием сигналов ДП и датчика скорости, а также сглаживающего фильтра) формируется и сигнал главной обратной связи по положению в позиционных системах [8].

Перейдем к рассмотрению некоторых особенностей схем ЭП, использующих ЧТУ и построенных на базе вентильного привода (ВП) с управлением моментом.

Электрические приводы с частотно-токовым управлением. Приводы, построенные с использованием классического ЧТУ [4], характеризуются тем, что выходной ток усилителя мощности (УМ), он же – ток якоря ИД, формируется пофазно и его значение, частота и фаза, а также форма кривой задаются управляющим сигналом, который подается на вход УМ через предварительный каскад (ПК), содержащий, как правило, гистерезисный элемент.

В общем случае для формирования управляющих сигналов схема ЭП снабжается специальным устройством – формирователем управляющих сиг-

налов (ФУС) [9, 10]. В свою очередь, в ФУС, который управляется сигналами с ДП (как правило, через электронный преобразователь сигналов (ПС) [10]), входной сигнал ЭП (сигнал ошибки ΔU) умножается на тригонометрические функции угла поворота ротора или потока ИД (например, на $\sin \alpha$ и $\cos \alpha$ для двухфазных схем). Выходные сигналы ФУС подаются на вход соответствующих фаз УМ и формируют его выходной ток – ток якоря ИД.

Следует сказать, что наиболее целесообразным представляется использование ЧТУ в системах управления (СУ) астрономическими инструментами. К подобным ЭП предъявляются высокие требования по точности наведения и плавности слежения в большом диапазоне частоты вращения, в том числе и на инфранизких скоростях (примерно один оборот в сутки). Поэтому ИД, СГ и ДП стараются разместить непосредственно на валу нагрузки (инструмента), с тем чтобы исключить механические устройства соединения (муфты и редукторы) с их люфтами и упругими деформациями из контура регулирования. Для этого используют электрические машины с большим коэффициентом редукции (отношением частоты питания к частоте вращения выходного вала), обеспечивающие при заданной мощности высокий вращающий момент при низкой частоте вращения. Это, например, синхронные машины с электромагнитной редукцией частоты вращения или с зубцовым шагом обмотки [3], т.е. с большим числом полюсов.

В таких СУ основным источником неплавности вращения оказывается несинусоидальность кривой якорного тока. В целях приближения кривой якорного тока к синусоиде стремятся исключить из неё наиболее низкие из высших гармоник. Для этого формируют управляющий сигнал УМ в виде многоступенчатой квазисинусоидальной кривой [10], при этом число ступеней может достигать нескольких десятков за период [3]. Кривая формируется на выходе ФУС (см. рис. 1, где показана одна фаза ФУС) с помощью набора из N резистивно-ключевых схем (РКС) – последовательно соединенных высокоточного резистора R_i и быстродействующего ключа K_i [10]. Это обеспечивает высокую точность и быстродействие формирования управляющих сигналов УМ.

Проводимость резисторов в фазах распределяется в соответствии с формулой [10]:

$$G_{ij} = G_0 \cos \left[\alpha_0 + \frac{\pi}{N} (i-1) - \varphi(j-1) \right], \quad (1)$$

где α_0 – произвольный начальный угол; $\varphi = 2\pi/m$ или $\varphi = \pi/m$ соответственно для нечетного и четного числа фаз m . При этом, к какому из двух контактов ключа – замкнутому или разомкнутому –

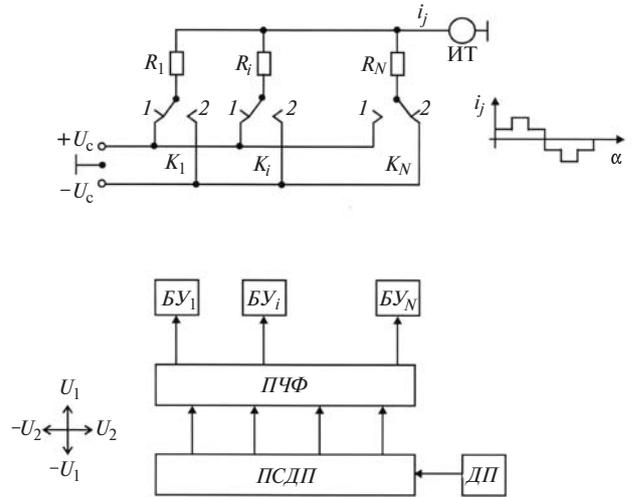


Рис. 1. Схема формирования управляющих сигналов (ФУС): ДП – датчик положения; ПС ДП – преобразователь сигналов ДП; ПЧФ – преобразователь числа фаз; БУ – блок управления ключом (K); 1, 2 – контакты ключа; ИТ – измеритель тока; i_j – выходной ток ФУС

подсоединяется данный резистор в начальный момент, определяется знаком косинуса в (1).

Входным сигналом ФУС является парафазное напряжение постоянного тока $+U_c$ и $-U_c$, значение которого пропорционально сигналу ошибки ΔU (на выходе входного блока сравнения). Управление ключами ФУС осуществляется от ПС ДП, как правило, через преобразователь числа фаз (ПЧФ), обычно резисторного типа.

Выходным сигналом ФУС является ток

$$i_j = I_m \left\{ \sin[\alpha - \varphi(j-1)] + \sum_{l=1}^{\infty} \frac{1}{2N \mp 1} \times \sin[(2Nl \mp 1)\alpha - 2Nl\alpha_0 \pm \varphi(j-1)] \right\}, \quad (2)$$

где $I_m = \frac{2N}{\pi} U_c G_0$.

Число (N) РКС в каждой фазе ФУС определяет число ступеней в квазисинусоидальной кривой, равное $2N$ за период. Последнее определяет номера двух первых из высших гармоник ($v = 2N \mp 1$) с амплитудами, обратно пропорциональными их номерам, и цикличность пульсации момента от их наличия.

Размах пульсации момента (для $N \gg 1$) [3]

$$\Delta M = \frac{1,24}{N^2} M_{cp} \quad (3)$$

при $2Ni$ циклов за оборот ротора с амплитудой

$$A = \frac{2}{(2N-1)(2N+1)} \approx \frac{1}{2N^2}. \quad (4)$$

Здесь $i = Z_r$ (число зубцов ротора ИД с электромагнитной редукцией частоты вращения) или $i = p$ (число пар полюсов в ИД с зубцовым шагом обмотки).

Рассмотренный ФУС может стать основой для создания высокоточного реверсивного и быстродействующего тахогенератора (ТГ), построенного на СГ и ДП на его валу [7]. В этом случае на вход каждой фазы ФУС подается парафазное напряжение с выхода соответствующей фазы СГ, а ключи РКС переключаются с помощью ДП с ПЧФ на выходе [3, 10]. При одинаковом числе полюсов СГ и ИД (что и делают на практике) ДП и ПЧФ могут быть использованы и для создания управляющего сигнала УМ, и для преобразования сигнала СГ в сигнал ТГ в виде постоянного тока [3]. Сигнал ТГ пропорционален частоте вращения, а полярность (знак) определяется направлением вращения СГ. Выражение для выходного тока ТГ имеет вид [7]:

$$i_{\text{ТГ}} = c_e \Omega \left[1 - \sum_{l=1}^{\infty} \frac{2}{(2Nl-1)(2Nl+1)} \cos 2Nli\alpha \right], \quad (5)$$

размах пульсации (при $N \gg 1$)

$$\Delta i_{\text{ТГ}} = \frac{1,24}{N^2} i_{\text{ТГ.ср}}. \quad (6)$$

Описанное устройство ФУС и ТГ позволяет разработать высокоточный привод с высокой плавностью вращения в большом (до 100000) диапазоне частот вращения, начиная с долей оборота в сутки. При этом для таких приводов с ЧТУ предпочтительно использовать двух-, а не трехфазные схемы ЭП, в том числе с УМ, выполненным в виде трехфазного мостового инвертора (МИ). В двухфазных ИД отсутствует взаимоиндуктивная связь между фазными обмотками, что, во-первых, дает возможность уменьшить, а иногда и исключить из силовой цепи дополнительные дроссели, ограничивающие скорость нарастания тока в цепи ИД, и, во-вторых, исключает влияние смежных фаз на частоту ШИМ, что имеет место в трехфазных схемах.

В ЭП с синхронными исполнительными агрегатами (ИА) [12, 3], содержащими на одном статоре ИД, СГ и ДП (это делается с целью упрощения конструкции и уменьшения массы и габаритов ИА), в двухфазном варианте удается исключить взаимоиндуктивную связь измерительных обмоток СГ с силовыми обмотками ИД. Наличие взаимной индуктивности $L_{\text{ис}}$ ограничивает частоту среза ЛАЧХ, равную [3]:

$$\omega_{\text{кр}} = \sqrt{\frac{k_M c_e}{J L_{\text{ис}}}}, \quad (7)$$

где $k_M = \frac{M}{I}$; $c_e = \frac{\Omega}{E}$; E – ЭДС СГ; J – суммарный момент инерции вращающихся частей ИА и нагрузки.

В трехфазном варианте ИА не удается добиться $L_{\text{ис}} = 0$, для компенсации её влияния приходится применять специальные меры, например использовать в силовой цепи ИД последовательно с обмоткой специальные дроссели, вторичные обмотки которых включаются в выходную цепь СГ. Однако полной компенсации не достигается, особенно при несинусоидальной форме тока.

Рассмотренные выше СУ ЭП были использованы для управления астрономическими инструментами, в частности кинофототеодолитом (КФТ) «Висмутин» и лазерным локатором (ЛЛ) «Крона», а также в специализированной системе наведения и слежения (ССНС) [3]. Для КФТ и ЛЛ были разработаны ЭП на синхронных машинах с электромагнитной редукцией частоты вращения и значениями момента 10 и 30 кг·м при $i = Z_2 = 100$, а также 100 и 200 кг·м при $i = Z_2 = 195$. Колебания момента в первом случае не превышали 0,32% ($N = 20$), во втором – 0,2% ($N = 24$); крутизна ТГ – соответственно 1 и 5 мВ на оборот в сутки.

Аналогичными характеристиками обладает и ЭП ССНС, выполненный на синхронных машинах с зубцовым шагом обмотки (и скосом пазов). Число зубцов на статоре было выбрано $Z_1 = 72$, число полюсов $2p = 60$.

Электрические приводы на базе вентильных схем. Характерная особенность вентильных приводов (ВП) с управлением моментом – опосредованное формирование якорного тока по заданному значению тока питания УМ. При этом входному сигналу УМ (ΔU) может соответствовать только значение (амплитуда) якорного тока, а частота, фазовые соотношения и форма кривой якорного тока определяются структурой УМ.

В схеме ВП отсутствует ФУС и сигналы с ДП подаются (как правило, через ПС, в состав которого в реверсивных схемах включают устройство переключения порядка чередования фаз) непосредственно на управляющие входы ключей УМ. Порядок включения ключей УМ определяет форму якорного тока ИД.

Так, при использовании в УМ трехфазного МИ форма тока будет соответствовать (при ортогональности векторов потока и результирующего тока якоря) квазисинусоидальной ступенчатой кривой с нулевой ступенью при отсутствии только кратных трем гармоник. Амплитуда кривой тока регулируется изменением тока питания МИ, для чего в классической схеме ВП [13, 5] имеется специальное устройство – регулятор тока (РТ) питания УМ

(иногда называемого электронным коммутатором [13]). Часто, особенно в ВП, работающих на средних частотах вращения, функции РТ возлагают на УМ, для чего работу ключей УМ переводят в режим ШИМ [3]. Однако в конечном счёте ток якоря регулируется изменением тока потребления УМ.

Отметим, что в ВП коэффициент преобразования тока питания УМ в амплитудное значение тока якоря зависит от $\cos\varphi$ нагрузки, т.е.

$$I_{\Pi} = I_{\text{H}} \cos\varphi, \quad (8)$$

и при изменении значения φ в процессе работы (что часто имеет место на практике) соотношение между I_{Π} и I_{H} меняется. Кроме того, наличие угла φ нагрузки приводит к прерыванию тока потребления (питания) МИ на время $t = \varphi / \Omega$ в каждом полупериоде частоты вращения [11]. Поэтому использование в качестве сигнала обратной связи по току напряжения, пропорционального току потребления, возможно только при условии $\cos\varphi = 0$ (как при управлении ИД синхронного типа с гладким якорем). В противном случае ($\cos\varphi \neq 0$) в качестве сигнала обратной связи по току можно использовать либо напряжение, пропорциональное сумме выпрямленных токов фаз статора [11], либо (при УМ в виде трехфазного МИ) сумму токов, протекающих в общей шине питания транзисторов, подключенной к минусовой клемме источника питания, и токов, протекающих в общей шине диодов, подключенной к плюсовой клемме источника питания [11, 14] (рис. 2).

И в том, и в другом случаях при изменении значения $\cos\varphi$ изменяется ток питания УМ, а ток яко-

ря ИД будет поддерживаться на заданном уровне (при условии $U_{\text{зад}} = \text{const}$). Отметим, что обе эти схемы оказываются нечувствительными к «провалам» тока питания УМ [11].

Классическую структуру ВП с разделением функций регулирования тока и коммутации ключей в УМ целесообразно применять в высокоскоростных системах управления. При этом наибольшее распространение находят неререверсивные схемы ввиду простоты их реализации [5]. Отметим, что ВП с синхронным ИД мощностью 1–3 кВт целесообразно применять при частоте вращения ИД до 30000 об/мин, а ВП с асинхронным ИД той же мощности могут работать до частоты вращения 100000 об/мин.

Как пример ВП с синхронным ИД можно привести схему привода шлифовального станка [5]. Регулятор тока здесь построен на транзисторах, работающих в режиме ШИМ, а УМ – на трехфазном МИ, транзисторные ключи которого работают на частоте вращения ИД в режиме шестишагового управления [11]. В качестве ИД применена синхронная машина с гладким якорем и возбуждением от постоянных магнитов, снабженная обмотками СГ, используемого в качестве датчика скорости, и набором из трех микросхем с датчиками ЭДС Холла, образующих ДП. Электропривод снабжен ПС ДП, преобразующим дискретные сигналы микросхем в аналоговые сигналы квазисинусоидальной формы [15]. На выходе ПС установлен упомянутый выше сглаживающий фильтр, на вход которого, кроме сигнала с ПС ДП, подается сигнал с СГ (рис. 3), компенсирующий запаздывание в форми-

ровании выходных сигналов микросхем и самого фильтра. Формирование сигналов управления ключами $T_1 - T_6$ МИ обычно возлагается на контроллер [3], осуществляющий сдвиг фаз тока на 90° по отношению к потоку. Ток якоря регулируется изменением выходного тока РТ, так как значение $\cos\varphi$ для такого типа ИД близко к единице.

Схема рассчитана так, что при высоких значениях частоты вращения (более 5000 об/мин) управление ключами МИ осуществляется от напряжения, пропорционального интегралу от ЭДС СГ (и ИД). Электропривод был разработан на мощность 3 кВт и диапазон частот вращения 3000 – 30000 об/мин. Отметим, что применение трехфазного МИ было возможно благодаря большому моменту инерции нагрузки, сгладившим влияния 5-й и 7-й гармоник якорного тока ИД.

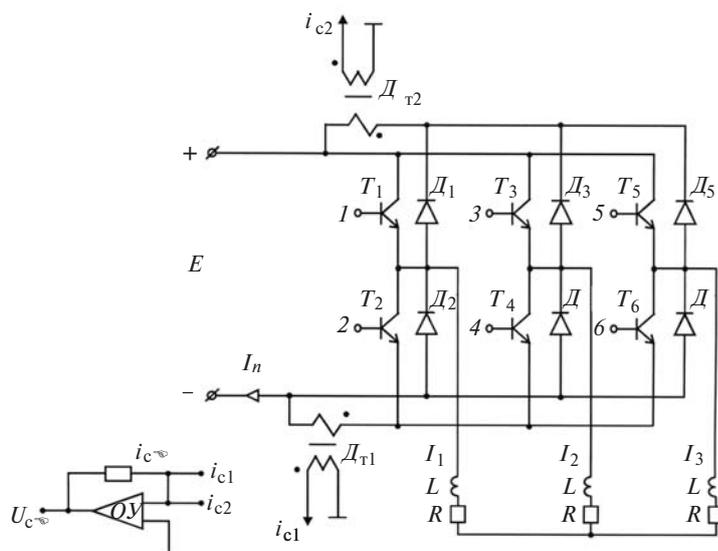


Рис. 2. Схема формирования обратной связи по току в трехфазном мостовом инверторе (МИ): $T_1 - T_6$ – транзисторы МИ; ДТ – датчик тока; ОУ – операционный усилитель

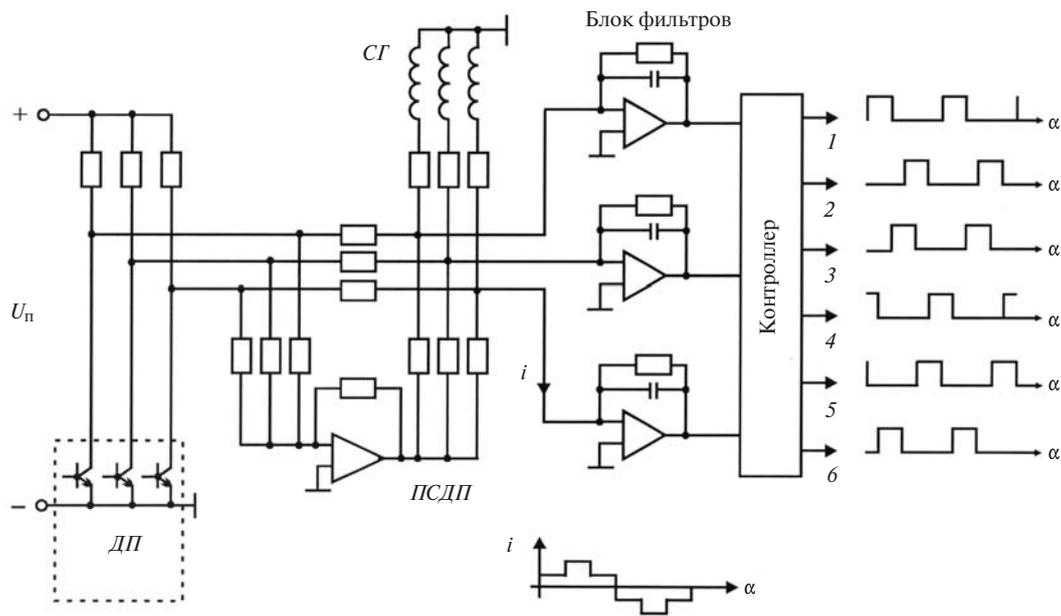


Рис. 3. Схема формирования сигналов управления транзисторными ключами МИ: ДП – датчик положения с выходными транзисторами микросхем (датчиков Холла); ПСДП – преобразователь сигналов ДП в аналоговый сигнал квазисинусоидальной формы; СГ – синхронный генератор (датчик скорости)

Следует отметить, что в построении ВП с синхронным ИД явно просматривается аналогия с приводом постоянного тока [3], в том числе построенном на основе бесконтактного двигателя постоянного тока [16], иногда называемого двигателем с электронным коллектором (коммутатором). Приводы с управлением моментом коллекторного ИД находят широкое применение, в том числе в системах управления летательных аппаратов, в качестве электрических рулевых приводов [3].

Возвращаясь к построению ВП с управлением моментом, необходимо отметить следующее. При необходимости уменьшить пульсацию момента в ЭП с УМ в виде МИ можно использовать, например, пятифазную схему ЭП, однако более рациональной оказывается шестифазная схема. Для этого на статоре ИД размещают две трехфазные обмотки, одноименные фазы которых сдвинуты относительно друг друга на 30° , и два ДП на трех микросхемах каждый, а УМ выполняют двухканальным с трехфазным МИ в каждом канале для управления соответствующей трехфазной обмоткой ИД. Сигнал обратной связи по току можно получить с выхода выпрямителя тока нагрузки (шести- или трехфазного) или используя схему, показанную на рис. 2 (с двумя датчиками тока). В такой схеме пульсация момента будет в 4 раза меньше, чем в трехфазном варианте МИ и ИД.

Иногда улучшить форму выходного напряжения УМ и, соответственно, форму его выходного тока можно за счет применения многофазных преобразователей с трансформаторным выходом [10, 5].

Это относится, например, к системам форсированного разгона (ФР) с управлением моментом асинхронных гиromоторов (ГМ) [5, 17], так как начальная частота f_{1H} выходного напряжения УМ здесь (в отличие от синхронных ИД) не равна нулю, а ее значение определяется по формуле

$$f_{1H} \geq \Delta f = \frac{r_2}{2\pi L_0}, \quad (9)$$

где r_2 , L_0 – сопротивление вторичной цепи и индуктивность намагничивающей цепи ИД.

Поскольку на ГМ нельзя поставить ни ДП, ни СГ, то частота вращения регулируется от сигнала, пропорционального ЭДС вращения ГМ [17]. При этом в ЭП с помощью РТ поддерживается постоянное значение тока якоря на максимально возможном для данного типа ГМ уровне, что при выполнении условия [5]

$$\frac{\omega_1}{E} = \frac{\sqrt{2}}{I_1 L_0}, \quad (10)$$

где ω_1 – частота токов якоря; E – ЭДС ГМ, обеспечивает максимально возможный момент ГМ, равный в этом случае

$$M_{\max} = c_m I_1^2, \quad (11)$$

и, следовательно, минимальное время разгона ГМ.

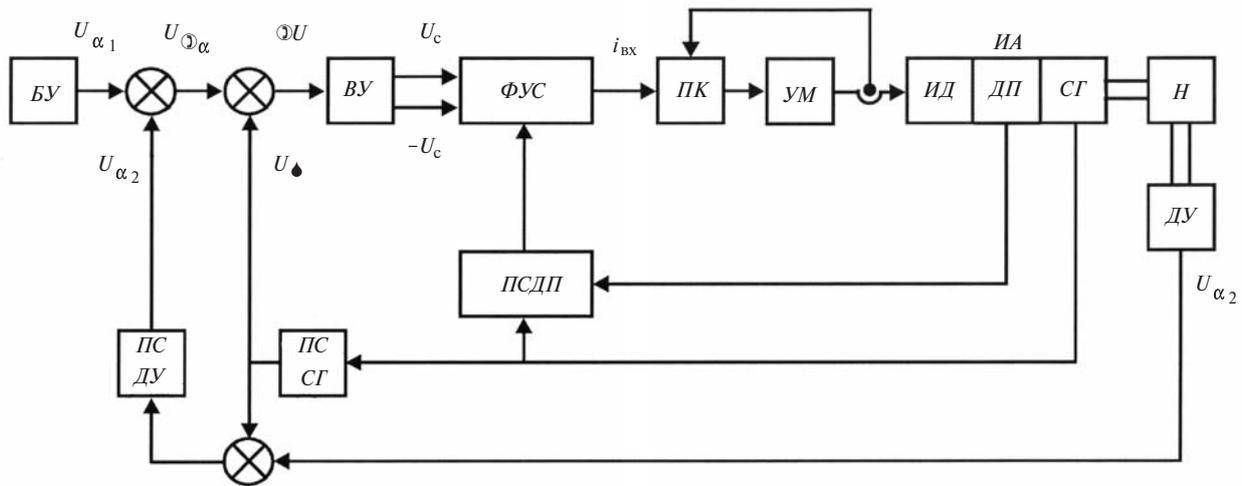


Рис. 4. Блок-схема позиционного реверсивного привода с ЧТУ: БУ – блок управления; ВУ – входное устройство; ФУС – формирователь управляющих сигналов; ПК – предварительный каскад; УМ – усилитель мощности; ИА – исполнительный агрегат; ИД – исполнительный двигатель; ДП – датчик положения; СГ – синхронный генератор (датчик скорости); Н – нагрузка; ДУ – датчик угла (датчик главной обратной связи); ПСДУ – преобразователь сигналов ДУ; ПССГ – преобразователь сигналов СГ; ПСДП – преобразователь сигналов ДП

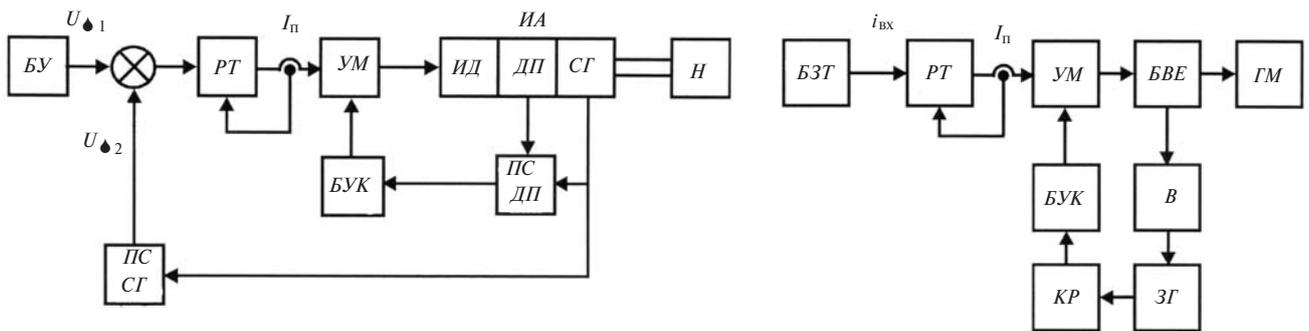


Рис. 5. Блок-схема замкнутого по скорости синхронного неререверсивного вентильного привода с УМ: БУ – блок управления; РТ – регулятор тока; УМ – усилитель мощности (электронный коллектор); ИА – исполнительный агрегат; ИД – исполнительный двигатель; ДП – датчик положения; СГ – синхронный генератор (датчик главной обратной связи); ПССГ и ПСДП – соответственно преобразователи сигналов СГ и ДП; БУК – блок управления ключами УМ; $I_{п}$ – ток питания УМ

Рис. 6. Блок-схема асинхронного вентильного привода для форсированного разгона гиromоторов: БЗТ – блок задания тока управления ($i_{вх}$); РТ – регулятор (стабилизатор) тока питания $I_{п}$ УМ; УМ – усилитель мощности; БВЕ – блок выделения ЭДС ГМ; ГМ – гиromотор асинхронного типа; В – выпрямитель; ЗГ – задающий генератор (схема Роэра); КР – кольцевой распределитель выходных импульсов ЗГ; БУК – блок управления ключами УМ

Поскольку применение ГМ предъявляет высокие требования к форме питающего напряжения, в частности коэффициент гармоник [10]

$$k_{\Gamma} \approx \frac{0,907}{N} \quad (12)$$

не должен превышать 10–15 %, то в одном из вариантов системы ФР УМ был выполнен на девяти ($N=9$) однофазных каскадах с выходным трансформатором, вторичные обмотки которых объединены в трехфазную систему с соединением фаз в «звезду» [10]. Выходная мощность равнялась 1600 Вт, диапазон изменения частоты составлял 21 (50÷1050 Гц), а диапазон изменения напряжения – 7 (20÷140 В); привод предназначался для разгона трех ГМ гиromоторы и обеспечивал уменьшение времени разгона в 6÷8 раз.

Заключение. На средних частотах вращения при отсутствии высоких требований к форме кривой якорного тока обе рассмотренные схемы ЭП могут использоваться на практике, так как отличаются незначительно.

Так, привод с ЧТУ, построенный по двухфазной схеме с ДП на четырех микросхемах (с датчиками ЭДС Холла), по сравнению с ВП, выполненном на УМ в виде трехфазного МИ с ДП на трех микросхемах, обеспечивает несколько лучшую форму кривой тока якоря (кроме 3-й, отсутствует еще и 5-я гармоника). Однако оказывается сложнее в построении: содержит восемь силовых ключей против шести и два отдельных (по фазам) канала формирования ШИМ против одного, общего

для трех фаз МИ, канала формирования ШИМ в ВП. Так что выбор той или иной схемы ЭП остается за разработчиком системы управления и требований к ЭП с ее стороны. Достаточно сказать, что в самых быстроходных современных катерах «Мираж» и «Соболь» ЭП интерцепторов с аналогичными характеристиками были выполнены по разным схемам – в первом используется ЧТУ [18], во втором – ВП с управлением моментом ИД [19, 3].

Все же, на взгляд автора, в высокоточных СУ, особенно работающих на низких и инфранизких частотах вращения, предпочтительнее использовать схемы с ЧТУ, а в быстроходных приводах с большим моментом инерции нагрузки или при невысоких требованиях к плавности вращения – ВП с управлением моментом ИД, в том числе и выполненный по классической схеме.

Выше на рис. 4–6 представлены примерные (упрощенные) блок-схемы указанных приводов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Следящие приводы**, т.2/Под ред. Б.К. Чемоданова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003.
2. **А.с. 253226 (СССР)**. Бесконтактный реверсивный регулируемый привод/В.Н. Бродовский, Б.Н. Каржавов, Ю.П. Рыбкин. – БИ, 1969, № 30.
3. **Баранов М.В., Бродовский В.Н., Зимин А.В., Каржавов Б.Н.** Электрические приводы с моментным управлением исполнительными двигателями. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2006.
4. **А.с. 186018 (СССР)**. Способ управления бесколлекторным электроприводом постоянного тока/В.Н. Бродовский, Ю.А. Кузнецов. – БИ, 1996, № 18.
5. **Бродовский В.Н., Каржавов Б.Н.** Вентильные приводы с моментным управлением. – Вопросы оборонной техники, 2002, вып. 2, сер. 9.
6. **А.с. 552663 (СССР)**. Бесконтактный реверсивный тахогенератор постоянного тока/Б.Н. Каржавов, В.Н. Бродовский, Ю.П. Рыбкин. – БИ, 1997, № 12.
7. **Бродовский В.Н., Каржавов Б.Н., Рыбкин Ю.П.** Бесколлекторные тахогенераторы постоянного тока. – М.: Энергоиздат, 1982.
8. **А.с. 1019976 (СССР)**. Следящий электропривод/В.Н. Бродовский, Б.Н. Каржавов, Ю.П. Рыбкин. – БИ, 2001, № 10.
9. **А.с. 878154 (СССР)**. Бесконтактный реверсивный регулируемый привод постоянного тока/Б.Н. Каржавов, Ю.П. Рыбкин, В.Н. Бродовский и др. – БИ, 2000, № 10.
10. **Каржавов Б.Н.** Функциональные квазисинусоидальные преобразователи. – М.: НТЦ «Информ-техника», 2003.
11. **Каржавов Б.Н.** Анализ работы трехфазных инверторов при различных способах управления ключами. – Вопросы оборонной техники, 2007, вып. 1, сер. 9.
12. **Патент 2112309 (РФ)**. Электроагрегат/В.Н. Бродовский, Б.Н. Каржавов, В.П. Петухов, Ю.П. Рыбкин. – БИ, 1998, № 15.
13. **Бутаев Ф.И., Эттингер Е.Л.** Вентильный электропривод. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1951.
14. **А.с. 515227 (СССР)**. Инвертор/В.Н. Бродовский, Б.Н. Каржавов, Г.И. Геруцкий. – БИ, 1976, № 19.
15. **Патент 2061299 (РФ)**. Электропривод/В.Н. Бродовский, А.А. Желябовский, Б.Н. Каржавов, Ю.П. Рыбкин и др. – БИ, 1996, № 13.
16. **Балагуров В.А., Гридин В.М., Лозенко В.К.** Бесколлекторные двигатели постоянного тока с постоянными магнитами. – М.: Энергия, 1975.
17. **А.с. 284868 (СССР)**. Способ ускоренного разгона гиромотора/В.Н. Бродовский, А.А. Замброжицкий, Б.Н. Каржавов. – БИ, 1971, № 35.
18. **Патент 2087068 (РФ)**. Электропривод/В.Н. Бродовский, Б.Н. Каржавов, В.П. Петухов, Ю.П. Рыбкин. – БИ, 1997, № 22.
19. **Патент 2392730 (РФ)**. Электрический следящий привод/Б.Н. Каржавов, Н.В. Буторин, В.Н. Бродовский. – БИ, 2010, № 17.

[09.11.10]

Автор: Каржавов Борис Николаевич окончил радиофакультет Московского электротехнического института связи в 1957. В 1990 г. защитил докторскую диссертацию «Приборы и устройства систем управления и специальных электроприводов». Главный научный сотрудник ЦНИИ автоматики и гидравлики.

* * *

Уважаемые авторы!

Редакция публикует при каждой статье краткие сведения об авторах. В связи с этим просим вас при направлении статьи в редакцию сообщать:

полные имена и отчества всех авторов;

какой факультет, какого вуза и когда закончил;

когда получил ученую степень, где и по какой тематике (теме) была защита;

место работы и должность.

Кроме того, напоминаем, что на каждую статью следует представлять краткий (4–5 предложений) реферат на русском и английском языках (включая название), а также ключевые слова.