

# Построение синхронных агрегатов для электроприводов с управлением моментом исполнительного двигателя

КАРЖАВОВ Б.Н.

*Рассмотрено построение электрических агрегатов, содержащих синхронный исполнительный двигатель, синхронный генератор как датчик скорости вращения и датчик положения ротора (аналогового или дискретного типа). Отмечены достоинства и недостатки трехмашинных агрегатов (построенных на трех отдельных электрических машинах) и агрегатов, в которых указанные устройства размещены на одном магнитопроводе. Приведены результаты сравнительного анализа трех модификаций конструкции таких агрегатов и рекомендованы области их применения.*

**Ключевые слова:** электропривод, синхронный агрегат, синхронный двигатель, синхронный генератор, датчик положения, управление моментом

Электрические приводы (ЭП) со способом управления моментом (МСУ) [1, 2] исполнительными двигателями (ИД), в том числе исполнительными синхронными двигателями (СД), находят широкое применение в промышленности и специализированных системах управления (СУ) [1, 3].

Как известно, для получения максимально возможного (при заданном токе  $I$  статора) вращающего момента  $M$  ИД необходимо обеспечить ортогональность векторов магнитного потока  $\Phi$  и результирующего тока  $I$  статора, поскольку

$$M = c_M \Phi I \sin \varphi,$$

где  $\varphi$  — угол между векторами потока  $\Phi$  и тока  $I$ .

Очевидно, что для поддержания значения  $\varphi = 90^\circ$  необходимо знать угловое положение потока ротора, для чего в СД устанавливается датчик положения (ДП) ротора (ДПР) [4] или потока ротора (ДПП). Такая установка ДП делает СД бесконтактным аналогом ИД постоянного тока (ПТ) [5], а ЭП [4] с таким ИД становится аналогом ЭП ПТ или вентильного привода (ВП) с регулированием напряжения питания ИД [6] или тока потребления усилителя мощности (УМ) в виде электронного коллектора [7, 2]. Однако ЭП с ИД переменного тока обладают несколько лучшими регулировочными характеристиками, чем ЭП ПТ, так как их структура позволяет регулировать ток ИД непосредственно в статоре, что исключает влияние  $\cos \varphi$  электрической машины (ЭМ) на формирование момента ИД [7]. Поэтому рассматриваемый ЭП це-

*Construction of electric machine sets containing a synchronous actuator motor, a synchronous generator as a rotation frequency sensor, and an analog or discrete rotor position sensor is considered. Advantages and disadvantages of using three-machine sets (constructed on the basis of three individual electrical machines) and sets in which the above-mentioned devices are installed on a common magnetic core are pointed out. Results from a comparative analysis of three design versions of such sets are given, and fields of their application are recommended.*

**Key words:** electric drive, synchronous machine set, synchronous motor, synchronous generator, position sensor, control of torque

лесообразно называть синхронным ЭП с МСУ ИД [1, 2].

Отметим здесь, что МСУ ИД ПТ (ранее назывался токовым способом управления) известно давно. И до появления транзисторных УМ ИД в них управлялись от электромашинных усилителей (ЭМУ) [8]. Причем для управления частотой вращения ИД использовались ЭМУ с выходным напряжением, значение которого пропорционально значению входного сигнала, а для управления моментом ИД — ЭМУ с выходным током, пропорциональным входному сигналу. Поскольку характеристики ЭП с МСУ мягкие [2], то ЭП с МСУ в разомкнутой схеме имеют ограниченное применение. Например, они используются в системах вентиляции (на ветровую нагрузку) и в устройствах форсированного разгона гиromоторов [9]<sup>1</sup> или моторов-маховиков, выполненных либо на базе ДПТ [3], либо на асинхронных двигателях (АД) [1]. Причем в АД в качестве источника питания применялись ЭМУ именно с токовым выходом. Однако чаще всего в ЭП с МСУ включают датчик скорости (частоты вращения) (ДС) для придания жесткости внешним характеристикам [10]. При этом ДС в скоростных системах является датчиком сигнала главной обратной связи, а в позиционных СУ — датчиком корректирующего сигнала, еще и сни-

<sup>1</sup> Здесь организована положительная обратная связь, обеспечивающая в процессе разгона пропорциональность частоты питающего напряжения гиromотора значению его ЭДС, при поддержании максимально возможного значения тока статора [7, 9].

жающим порядок передаточной функции ЭП. Таким образом, в ЭП с МСУ исполнительный орган содержит три устройства: ИД, ДП и ДС.

Однако не всегда ДП и ДС выполняются как отдельные устройства: в ЭП с ИД ПТ (по существу, СД с механическим коммутатором тока) в качестве ДП (в данном случае распределителя тока по обмоткам) служит коллектор, а в качестве сигнала ДС может использоваться ЭДС ИД [1, 3].

Но наибольшее распространение получили ЭП с ИД переменного тока с тремя отдельными устройствами (ИД, ДП, ДС), часто объединенными в одном корпусе, образуя исполнительный агрегат (ИА). При этом в качестве ИД чаще всего используют СД, обладающий рядом известных преимуществ по сравнению с другими типами ИД. Так, СД обычной конструкции обладают большой перегрузочной способностью (особенно СД с возбуждением от постоянных магнитов) благодаря значительно лучшим условиям теплоотдачи (нагревается только статор). Отметим также высокий удельный момент СД, позволяющий развивать большое ускорение.

В качестве ДП применяют либо электромеханические ДПР – индукционные (типа СКВТ) [10] или индуктивные ДПР [1], либо магнитомодуляционные ДПП [11] с аналоговым выходом или электрические с дискретным выходом, например выполненные на основе микросхем (МС) с датчиками ЭДС Холла (ДХ) [12].

Как правило, ДС выполняется на основе синхронного генератора (СГ), являющегося идеальным измерителем частоты вращения  $\omega$ . Действительно, у него отсутствует напряжение при  $\omega = 0$ ; практически нет и зоны нечувствительности; он имеет большую крутизну и высокую линейность выходной характеристики ( $U = E = c_e \omega$ ); форма кривой его выходного напряжения (ЭДС  $E$ ) близка к синусоидальной [13].

Преобразование выходного напряжения СГ (переменной частоты) в реверсивный сигнал постоянного тока (сигнал ДС) проводится путем умножения фазовых напряжений на тригонометрические функции угла  $\alpha$  поворота ротора или потока ротора (например, на  $\sin p\alpha$  и  $\cos p\alpha$  в двухфазном варианте СГ) с последующим суммированием полученных произведений [14]:

$$U_{ДС} = U_m \sin p\alpha \sin p\alpha + U_m \cos p\alpha \cos p\alpha = U_m = c_e \omega.$$

Таким образом, при идеальной форме кривой выходного напряжения СГ и идеальных множительных устройствах (МУ) на выходе преобразователя (ДС) формируется постоянное напряжение, значение которого строго пропорционально значе-

нию частоты вращения  $\omega$ , а знак (полярность) определяется направлением вращения ротора СГ [13]. При этом в выходном напряжении ДС отсутствуют какие-либо пульсации, а формирование напряжения  $U_{ДС}$  проводится без запаздывания [13].

Очевидно, что для построения МУ необходимо знать угловое положение ротора или потока ротора СГ, для получения которого, как правило, используют ДП (ДПР или ДПП), размещенный на валу СГ<sup>2</sup>. В том случае, если ДС входит в состав ЭП с МСУ (в частности в синхронном агрегате (СА)), то при одинаковом числе полюсов и фаз в СД и СГ можно использовать один ДП и для формирования сигналов управления для УМ СД, и для МУ [10].

Из изложенного следует, что для построения ЭП с МСУ наиболее рационально использовать три устройства, а именно СД, СГ и общий ДП [13]. Часто эти три устройства размещаются на одном валу и располагаются в одном корпусе, образуя ИА, в данном случае синхронный агрегат СА [16]. Такие СА (с СД, ДПР и СГ) на ЭМ обычной конструкции [10, 3] были использованы в ЭП опытного образца космического манипулятора [3].

Однако наиболее рационально применять такую трехмашинную конструкцию в высокоточных низкочастотных ЭП с высокой плавностью вращения [1], выполненных на ЭМ с электромагнитной редукцией частоты вращения [16]. Такие ЭП используются, например, в СУ астрономическими инструментами с большим диапазоном регулирования частоты вращения (порядка  $100 \times 10^3$ ) [1, 3]. Несомненным преимуществом такой компоновки (с использованием трех отдельных ЭМ) является независимость работы СГ от процессов, протекающих в СД, что позволяет с высокой точностью определять частоту вращения СД (СА) в любой момент времени в широком диапазоне ее изменения. Это способствует обеспечению плавности вращения вала нагрузки в безредукторных (без механического редуктора (МР)) ЭП. Но отмечаются и очевидные недостатки: громоздкость конструкции и плохие массогабаритные показатели из-за больших массы и габаритов СА. Иногда, особенно при большом диаметре СД, удается уменьшить габариты СА, разместив СГ и ДП внутри ротора СД [16, 1], хотя при этом масса СА уменьшается незначительно.

Такие ЭП используются в передвижных СУ астрономическими инструментами (например, в СУ серийным кинофототеодолитом (КФТ) «Висмутин» [14] или в стационарных установках (в частности, в уникальной СУ лазерным локатором (ЛЛ) «Крона» [1, 3]), где требуется очень высокое качество управ-

<sup>2</sup> Если для этого не используется сигнал, пропорциональный интегралу от частоты вращения [15, 13].

ления, и прежде всего точность и плавность вращения, в том числе и при инфранизких частотах вращения (порядка долей оборота в сутки). При этом значение момента на валу СА может достигать сотен килограммометров. Так, СА в ЭП КФТ «Висмутин» при диаметре расточки СД азимутальной оси  $D_p = 400$  мм имеет  $M = 30$  кгж. Отметим, что диаметр расточки встраиваемых в СД СГ и ДП  $D_p = 220$  мм. Момент на валу СД ЭП ЛЛ «Крона» составляет по той же оси  $M = 200$  кгж при диаметре расточки  $D_p = 928$  мм. При расточке СГ и ДП  $D_p = 500$  мм [1].

Отметим, что на базе таких ЭМ были разработаны СА кольцевой конструкции для ЭП стационарного радиотелескопа НИРФ диаметром 20 м и моментом  $M = 76 \cdot 10^3$  кгж для азимутальной оси [3].

Однако на подвижных объектах и летательных аппаратах (ЛА) такая конструкция ИА не применима. Для этих целей была разработана конструкция СА с размещением всех трех устройств (СД, СГ и ДПП) на одном магнитопроводе [11, 12], обычно на магнитопроводе СД. Выбор в качестве базы для построения таких ИА СМ объясняется тем, что, используя магнитопровод СМ, можно построить и СД, и СГ, и ДПП аналогового типа (например магнитомодуляционного) [11] или дискретного типа (в частности построенного на ДХ) [1].

Здесь следует остановиться на выборе типа и конструкции СД для таких СА. В наибольшей степени для этих целей подходит СМ с зубцовым шагом обмотки [1] (обмотка «зуб—полюс» [17]) с возбуждением от постоянных магнитов с редкоземельными элементами, причем желательнее с большим числом полюсов  $2p$  на роторе [18]. Последнее объясняется тем, что в таких СД вращающий момент  $M$  зависит от числа пар полюсов  $p$  (где  $p$  по существу является коэффициентом электромагнитной редукции частоты вращения). Причем, чем больше значение  $p$ , тем больше значение  $M$  (но меньше частота вращения  $n$ , так как при  $P = \text{const}$   $M_n = \text{const}$ ). При этом соотношение числа полюсов  $2p$  на роторе и числа зубцов  $Z$  на статоре в таких СД определяется выражением [1]:

$$2p = Z \frac{mk - 1}{mk}, \quad (1)$$

где  $m$  — число фаз;  $k$  — число зубцов в фазовой группе.

Из (1) следует, что при постоянстве значений  $Z$  и  $m$  число полюсов определяется числом зубцов в фазовой группе (т.е. числом  $k$ ), причем чем больше  $k$ , тем больше  $p$ . Соответственно, и момент при одних и тех же габаритах СД при увеличении числа  $p$  будет больше. Или другими словами, при этом увеличивается удельный момент СД, а это означает,

что заданный момент такой СД может обеспечить при меньших габаритах (например при уменьшенной длине) и, соответственно, при меньшей массе. При этом уменьшаются потери в обмотке СД и ее нагрев.

На первый взгляд, зависимость  $M = j(p)$  представляется линейной. Однако из [19] можно сделать вывод, что зависимость эта оказывается скорее квадратичной, чем линейной. Объясняется это тем, что при большем числе полюсов (при заданном числе зубцов  $Z$  на статоре) поток ротора перераспределяется (концентрируется) в большей степени в «тянущие» зубцы<sup>3</sup>. Это можно показать, если положить (сугубо ориентировочно), что проводимость (а следовательно и значение потока) пропорциональна отношению  $2p/Z$ , и учитывая в общем случае

$$M = c_m p \Phi I,$$

а  $n = 60f/p$ , где  $f$  — частота питающего напряжения СД.

В этом случае

$$M = c_p p^2 \Phi I.$$

Это положение подтвердили сравнительные испытания серийного СА (№ 1), используемого в ЭП катера «Мираж», и макета экспериментального СА (№ 2), разработанного в качестве альтернативного варианта (при одинаковых диаметрах СА). Первый из них при  $m = 2$  имел параметры  $Z = 24$ ,  $2p = 18$  ( $k = 2$ ), а у второго (при том же диаметре)  $Z = 24$ ,  $2p = 22$  ( $k = 6$ ). Заданные выходные параметры (момент и частота вращения) при одинаковых входных параметрах (значениях напряжения и тока статора СД) СА № 2 обеспечивал при меньшей почти в 1,4 раза длине СД, т.е. почти на 15% меньше расчетного значения. На это следует обратить внимание разработчикам СД. Отметим, что в обоих СА используется аналоговый ДПП магнитомодуляционного типа.

Теперь рассмотрим построение СГ. Обмотки СГ (они же тахометрические обмотки СА) размещаются обычно в пазах статора СД. Иногда (в целях упрощения СА) обмотки СГ и СД укладываются параллельно. Например, так как было сделано в СА № 3 с параметрами  $Z = 12$ ,  $2p = 10$  (максимально возможное число при  $Z = 12$ ),  $m = 3$ ,  $k = 2$  [20]. Такое размещение обмотки СГ обеспечивает большую крутизну характеристики ДС для заданного типоразмера СА. Однако в этом случае возникает индуктивная связь между обмотками СГ и СД, кото-

<sup>3</sup> Т.е. увеличивается суммарная площадь перекрытия «тянущих» зубцов.

рая ограничивает полосу пропускания ЭП значением, равным критической частоте [21]:

$$\omega_{кр} = \sqrt{\frac{k_M c_e}{J L_{ДГ}}}, \quad (2)$$

где  $k_M = M / I$ ;  $c_e = U_{СГ} / \omega$ ;  $I$  — ток статора;  $U_{СГ}$  — выходное напряжение СГ;  $J$  — момент инерции вращающихся частей;  $L_{ДГ}$  — взаимдуктивность обмоток СГ и СД.

Для увеличения частоты  $\omega_{кр}$  в ЭП стремятся увеличить значения  $k_M$  и  $c_e$  и уменьшить значения  $J$  и  $L_{ДГ}$ . Поэтому такое размещение обмоток СД и СГ используют обычно в электрических рулевых приводах (ЭРП) ЛА с малогабаритными быстроходными СД, с высокой частотой питающего напряжения (как правило, с малым числом  $Z$  и  $2p$ ), в которых момент инерции ротора (и, следовательно, значение  $J$ ) и индуктивность обмотки СД  $L_{Д}$  (и, естественно, значение  $L_{ДГ}$ ) малы [1].

Обычно же в СА используют многополюсные СД с большим числом зубцов на статоре ( $Z \geq 24$ ). В таких ЭП не удастся значительно уменьшить значение  $J$  и для повышения частоты  $\omega_{кр}$  стремятся уменьшить значение  $L_{ДГ}$  (или добиться равенства ее нулю, что можно сделать в двухфазных СА) [1, 21]. Наиболее рациональным с этой точки зрения является разнесение обмоток одноименных фаз СГ и СД по разным зубцам. Типичным представителем такого решения является СА № 1 [11] (рисунок). Здесь для размещения обмоток СГ из общего числа зубцов  $Z$  выделяют  $mk$  зубцов (по одной фазовой группе на каждую фазу), на которых и размещают секции обмотки СГ. Обмоток СД на них не размещают, что исключает индуктивную связь между обмотками СД и СГ одной и той же фазы.

Поскольку в двухфазном СА теоретически нет индуктивной связи между обмотками разных фаз, то в таком СА значение  $L_{ДГ}$  теоретически равно нулю. В этом случае  $\omega_{кр} \rightarrow \infty$  и ограничения полосы пропускания не будет, что является достоинством таких СА. Отметим и их явный недостаток: выделение свободных от обмотки СД зубцов для СГ уменьшает момент СД, причем, чем больше значение  $k(mk)$ , тем меньше момент, так как уменьшается число витков в обмотке статора СД. Обычно выделяют одну фазовую группу [1] для обмотки одной фазы СГ. Тогда число зубцов с обмотками СД

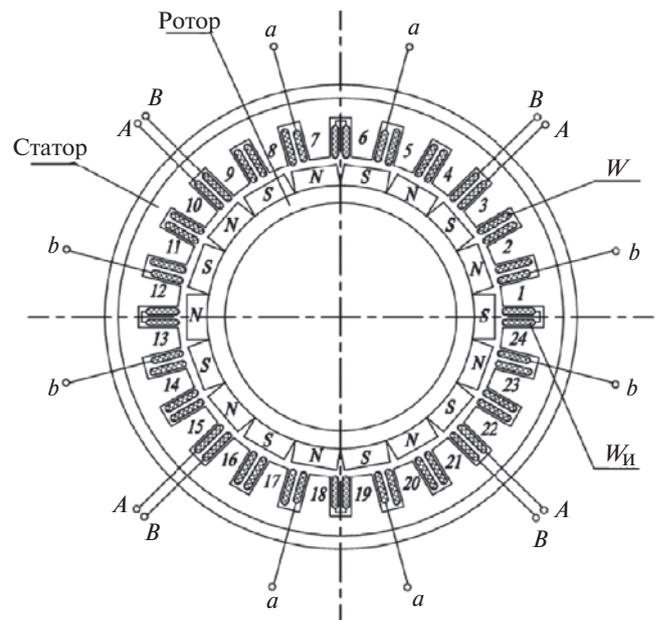
$$Z_{Д} = Z - mk.$$

Но одновременно с увеличением значения  $mk$  увеличивается и число  $2p$  в соответствии с формулой (1), а следовательно, и момент СД. Это в значительной степени компенсирует снижение момен-

та от уменьшения числа зубцов, выделенных под обмотку СД. Именно так был сделан СА № 1 [1].

В общем случае для увеличения вращающего момента СД следует выбирать большее число зубцов на статоре СА с тем, чтобы значение  $mk$  было значительно меньше  $Z$  (например,  $Z = 72$ ,  $2p = 60$ ,  $km = 6$  [1] или  $Z = 72$ ,  $2p = 66$ ,  $km = 12$ ). Однако существует и другое решение построения СА, не связанное с разделением обмоток СГ и СД по пазам. Так, в СА № 2 [22] обмотки разных фаз СГ и СД размещены в одних и тех же пазах. Здесь используется метод компенсации, для чего фазовые обмотки СГ выполняются из четного числа секций, объединенных в две группы. Каждая группа содержит две секции, которые размещены в противоположных (но не диаметрально, а, например, на расстоянии 9 зубцовых делений) пазах со встречным направлением тока в обмотке СД. Поэтому напряжение взаимдукции, наведенное в секциях, компенсируется и теоретически (при идеальном СА) исключается из выходного напряжения СГ (как это было, например, в СА № 1, где обмотки разных фаз СГ и СД расположены в одних и тех же пазах [11]).

Отметим здесь, что при таком расположении обмоток СГ, как в СА № 2, крутизна характеристики СГ оказывается небольшой (значение  $c_e$  мало): она ограничена местом (площадью) в пазу, выделенным под обмотку СГ за счет обмотки СД. Стремление повысить крутизну характеристики СГ путем увеличения числа витков в обмотке СГ приводит, во первых, к уменьшению момента (по-



Исполнительный агрегат с дискретным датчиком углового положения магнитного потока ИД (на датчиках Холла ДХ):  $A$  и  $B$  — выводы силовых обмоток  $W$  фаз ИД;  $a$  и  $b$  — выводы информационных обмоток  $W_u$  фаз СГ; ДХ устанавливаются на зубцах с номерами 2, 5; 8, 11 при  $m = 2$ ,  $k = 6$  или 3, 4; 6, 7; 10, 11 при  $m = 3$ ,  $k = 4$

сколько при этом уменьшается число витков в обмотке СД) и, во-вторых, — к значительному увеличению индуктивности  $L_{\Gamma}$  (и, соответственно,  $L_{ДГ}$ ), что сокращает полосу пропускания ЭП. К этому же результату приводит и постанова на выходе ДС ОУ, ограничивающего диапазон измерения частоты вращения. Поэтому в ЭП с большим диапазоном регулирования частоты (порядка  $100 \times 10^3$ ) стремятся поднять крутизну характеристики СГ без значительного увеличения числа витков (например, используя редукторные [13] или многополюсные [1] СГ) с тем, чтобы выходное напряжение ДС (на выходе схемы преобразования, выполненной здесь на пассивных элементах) непосредственно сравнялось с сигналом задания [13]. А уже значение ошибки ( $DW = W_{зад} - W_{н}$ ) подается на вход ОУ, который в данном случае ограничивает выходной ток УМ и момент СД, повышая надежность УМ и механических узлов ЭП.

К этому следует добавить, что при размещении обмоток СГ в пазах с обмотками СД наблюдается влияние тока статора на значение и форму кривой выходного напряжения СГ. Последнее приводит к появлению пульсаций на выходе ДС (в связи с образованием высших гармоник в кривой ЭДС СГ) и, соответственно, — к необходимости увеличивать постоянную времени сглаживающего фильтра на выходе ДС. А это также ограничивает полосу пропускания ЭП с такими СА. Еще одним недостатком совместного размещения обмоток СГ и СД является влияние технологических погрешностей изготовления СА на компенсационные способности обмотки СГ. Даже небольшие отклонения при изготовлении и укладке секций могут привести к возникновению значительных помех на выходе ДС, связанных с различием значений  $L_{ДГ}$  в секциях. При этом значение помехи тем больше, чем выше частота тока статора СД (в том числе, и частота ШИМ).

Для подавления напряжения помех приходится ставить дополнительный сглаживающий фильтр на выходе ДС. Это приводит к дополнительному запаздыванию формирования сигнала, пропорционального частоте вращения и влияет на постоянную времени в тракте коррекции ЭП. В конечном счете все это приводит к сокращению полосы пропускания ЭП с таким СА.

Следует сказать, что в СА № 1 при наличии технологических погрешностей также возникает индуктивная связь между обмоткой СД одной фазы и обмоткой СГ другой фазы. Однако эта связь значительно меньше, чем в СА № 2, так как обмотки размещены на разных зубцах и секции удалены друг от друга. Тем не менее даже такая малая связь

иногда (в частности в низкооборотных высокоточных приводах) может ограничить заданную полосу пропускания. В таком случае для уменьшения влияния взаимной индуктивности используют «экранирующие» зубцы, расположенные между зубцами СД и СГ и свободные от обмоток и СД, и СГ [1]. Такая операция уменьшает индуктивную связь в 7–8 раз; и если этого оказывается недостаточно, вводят еще один или два экранирующих зубца между соответствующими фазами СД и СГ. Отметим, что это можно сделать в СД с относительно большим числом зубцов, например  $Z = 72$  [1] при большом значении  $k$  ( $k = 4$  или 6). При малом числе зубцов (например  $Z = 24$ ) приходится выбирать компромиссное значение  $k$ , например  $k = 2$ , как в СА № 1. Такую операцию невозможно сделать в СА № 2, что ограничивает область его применения.

Рассмотрим теперь применение в СА дискретных ДП, построенных на основе ДХ [20, 1]. Датчик Холла является линейным элементом и разрабатывался прежде всего как МУ, умножающий значение тока возбуждения на значение магнитного потока [3]. Однако в связи с большим разбросом параметров и их нестабильностью ДХ не находят применения в СА. Здесь применяются МС с ДХ (называемые также ДХ), снабженные выходным компаратором [12]. Поэтому МС с ДХ является регистратором наличия (или отсутствия) магнитного потока заданного направления, если значение потока превышает порог чувствительности ДХ. При установке МС в магнитный зазор СД и вращении ротора на выходе МС образуется периодический дискретный однополярный сигнал прямоугольной формы. В общем случае этот сигнал с помощью электронной схемы преобразуется в двухполярный сигнал управления ключами УМ (выполняемого чаще всего в виде силового инвертора). При этом необходимо обеспечить равенство полупериодов выходного напряжения МС для подавления четных гармоник в нем и в токе статора СД.

Отметим, что применяемые в настоящее время ДХ с триггерным («запоминающим») эффектом, когда включение ДХ производится полюсом  $N$ , а выключение — полюсом  $S$  магнита, хотя и обеспечивают равенство полупериодов выходного напряжения ДХ, но вносят ошибку при измерении положения ротора на угол, соответствующий половине расстояния между магнитами ротора. Наличие сдвига фаз  $d$  приводит к уменьшению значения момента  $M$  и крутизны преобразования  $c_e$  сигнала СГ в напряжение  $U_{ДС}$  [13, 21], так как

$$M \propto \Phi I \sin(90^\circ \pm d); \quad U_{ДС} \propto c_e W \cos d,$$

а также существенно, особенно при большом значении  $N$ , повышает значение пульсации выходного

напряжения ДС, поскольку в этом случае размах пульсации, например при использовании двухфазного двухполупериодного выпрямителя напряжения ( $m=2, N=2$ ), будет определяться выражением

$$DU_{DC} = U_{DC} \frac{e}{e} \left[ 1 - \cos \frac{\alpha p}{4} + \frac{\dot{d}}{\omega} \right]$$

а при использовании такого же выпрямителя тока — выражением

$$DI_{DC} = I_{DC} [(\sqrt{2} - 1) + \sin d].$$

Для обеспечения равенства полупериодов в выходном напряжении ДПП, без сдвига фаз  $d$ , на наш взгляд, целесообразно использовать два ДХ (вместо одного), реагирующих только на наличие потока, причем один из них включается полюсом  $N$ , а второй полюсом  $S$  магнитов ротора или, если это возможно по конструктивным соображениям, разместить одинаковые ДХ на диаметрально расположенных зубцах.

При равенстве полупериодов спектральный состав выходного напряжения ДХ будет содержать только нечетные гармоники (с номерами  $n=2l \mp 1, l=1, 2, \dots$ ). Для приближения формы кривой выходного напряжения ДП и тока статора к синусоиде стремятся подавить<sup>4</sup> наиболее низкие гармоники в указанной кривой. В этих целях в ДП (точнее в ДПП) применяются несколько ( $N$ ) ДХ, для этого выбирают в формуле (1) значение  $mk$  больше двух [20, 1]. В этом случае значение тока статора  $SD$  будет определяться выражением [1]:

$$i_j = I_m \{ \sin[pa - j(j-1)] + \sum_{l=1}^{\infty} \frac{1}{1Nl \mp 1} \sin[(2Nl \mp 1)pa - 2Nlpa_0 \pm j(j-1)] \},$$

где  $a_0$  — произвольный начальный угол;  $N$  — число ДХ в ДПП;  $j = p/m$  или  $j = 2p/m$  для четного и нечетного числа  $m$  соответственно.

Отметим, что значение  $N$  не может быть больше значения  $mk$  и должно находиться в пределах  $2 \leq N \leq mk$ .

Наличие высших гармоник (с номерами  $n=2Nl \mp 1$  [23]) приводит к пульсации вращающего момента, выражение для которого в данном случае (при синусоидальной форме потока ротора) будет иметь такой вид:

$$M = M_{cp} \left[ 1 - \sum_{l=1}^{\infty} \frac{2}{(2Nl-1)(2Nl+1)} \cos 2Nlpa \right]. \quad (3)$$

Размах пульсации момента  $DM$  определяется формулой [1] (при  $N > 1$ ):

$$DM = \frac{1,24}{N^2} M_{cp}.$$

Учитывая, что  $a = \omega t$ , для дальнейших рассуждений обозначим частоту высшей гармоники  $\eta_l = 2Nlp$  как (см. формулу (3))

$$\omega_l = 2Nlp\omega. \quad (4)$$

Для оценки плавности вращения СА может быть использовано отклонение (колебание) либо частоты вращения ( $DW$ ) от заданного значения, либо отклонение (колебание) углового положения ротора  $Da$  также от заданного значения (в том числе и при вращении СА с заданной частотой). Определим зависимость величин  $DW$  и  $Da$  от значения пульсации момента, т.е. от величины  $DM$ . Примем, что пульсация частоты вращения в основном определяется первой гармоникой пульсации момента (т.е. значением  $\omega_1 = 2Nlp\omega$ , см. формулу (4) при  $l=1$ ) с амплитудой  $DM_1$ , равной (пренебрегая единицей по сравнению со значением  $2N^2$  в формуле (3)):

$$DM_1 = M_{cp} / 2N^2.$$

Поскольку  $DW_1 = De_1 / \omega_1$  (где  $De$  — колебание ускорения ротора СА), а  $De_1 = DM_{1H} / J$  (где  $DM_{1H}$  — в данном случае колебания момента  $M_{1H}$  на валу СД), то  $DW_1$ , например при  $M_H = pM$ , будет определяться выражением

$$DW_1 = \frac{M_{cp}}{4JN^3 p \omega}.$$

Таким образом, увеличение числа пар полюсов  $p$ , например в 2 раза, уменьшает пульсацию частоты вращения в 2 раза, а увеличение числа  $N$  ДХ в 2 раза уменьшает ее в 8 раз.

К аналогичному результату приводит и выбор в качестве критерия плавности колебания угла  $Da$ , применяемый иногда в ЭП астрономических инструментов, в частности на частоте вращения Земли, или в ЭП пленкопротяжных механизмов на частоте вращения, соответствующей скорости ЛА. В этом случае отклонение будет определяться выражением

$$Da = \frac{M_{cp}}{8JN^4 p^2 \omega^2}.$$

Следовательно, увеличение числа полюсов, например также 2 раза, уменьшает амплитуду колебаний угла в 4 раза, а увеличение числа  $N$  в 2 раза уменьшает ее в 16 раз. Поэтому колебания ротора,

<sup>4</sup> С помощью электронной схемы, например, формирователя управляющих сигналов (ФУС) [2, 23, 24].

например в СА № 2, где используется один ДХ на фазу ( $N=2$ ) при  $2p=22$  оказываются в 11 раз больше, чем, например, в СА № 1, где число ДХ выбрано равным двум на фазу ( $N=4$ ) при  $2p=18$ . Но это может оказаться недостаточно для низкооборотных приводов: в них, как указано выше, используют либо 6, либо 12 ДХ при соотношении  $Z=72$  и  $2p=60$  [1] ( $k=3$ ) или  $Z=72$  и  $2p=66$  ( $k=6$ ) при  $m=2$ . Наличие в токе СД СА № 2 высших гармоник (прежде всего третьей с амплитудой 33% и пятой с амплитудой 20%  $I_m$ ) приводит к дополнительным потерям мощности и нагреву обмотки СД.

Отметим также, что увеличение числа ДХ уменьшает пульсацию напряжения на выходе ДС, поскольку размах пульсации  $DU_{ДС}$  выходного напряжения  $U_{ДС}$  определяется формулой (при  $N > 1$ ) [1]

$$DU_{ДС} = \frac{1,24}{N^2} U_{ДС}$$

при частоте первой гармоники  $\omega_1 = 2Np\omega$ .

В этом случае увеличение числа  $N$  в 2 раза приводит к уменьшению амплитуды пульсации  $DU_{ДС}$  в 4 раза и дает возможность уменьшить емкость конденсатора фильтра (и, соответственно, его постоянную времени) в 8 раз.

Рассмотрим далее вопрос о месте расположения ДХ. Иногда, например в СД с гладким якорем, ДХ располагают по торцу зазора [12, 1]. В этом случае ДХ используются только в нижней части диапазона частот вращения. В основной части диапазона в качестве сигнала ДПП используется напряжение, пропорциональное интегралу от частоты вращения [2]. Однако в СД с зубцовой зоной ДХ размещают чаще всего на зубцах [20, 1] или в пазах статора [19].

Наиболее технологично размещать ДХ непосредственно на зубцах в специальном углублении в торцах [1] или в специальном кольцевом пазу, выбранном по торцу статора [20]. При этом желательно размещать ДХ на тех зубцах, где нет обмоток СД (как в СА № 1) для того, чтобы исключить влияние тока статора (точнее, потоков рассеяния) на точность определения углового положения ротора. Такое размещение ДХ можно использовать и в тех СА, где это влияние мало или требования по точности невысоки, например как в СА № 3 (учитывая, что в рассматриваемых СД с мощными магнитами влияние потоков рассеяния составляет доли процента).

В противном случае (при высоких требованиях к точности) ДХ приходится размещать в пазах [19] (как это сделано в СА № 2), где теоретически влияние тока СД на ДХ отсутствует. Однако это

технологически более сложно (особенно при прямых пазах) и не всегда удается сделать по конструктивным соображениям, например, при ширине паза меньше чем размеры ДХ или когда размеры ДХ меньше расстояния между коронками зубцов. В последнем случае приходится делать специальные крепежные детали для ДХ, что усложняет конструкцию и снижает точность измерения углового положения ротора СД (СА). Кроме того, в этом случае ДХ используют потоки рассеяния магнитов, часто не поддающиеся точному расчету.

**Выводы.** 1. В СА, выполненных на трех отдельных ЭМ, отсутствует какая-либо индуктивная связь обмоток СГ и СД, отрицательно влияющая на характеристики СГ и параметры ЭП в целом, ограничивая полосу пропускания последнего. Применение в таких СА ЭМ с электромагнитной редуцией частоты вращения при размещении СА непосредственно на валу нагрузки (без использования МР) позволяет построить ЭП с высокой точностью слежения и плавностью вращения нагрузки в большом ( $>100 \times 10^3$ ) диапазоне частот вращения, начиная с долей оборота в сутки при значительных (до 200 кгж) моментах на валу СД. Недостатком таких СА являются плохие массогабаритные показатели.

2. Трехмашинные ИА могут быть построены и на многополюсных ЭМ [1], в том числе и СМ с зубцовым шагом обмотки. В этом случае улучшаются массогабаритные показатели, но ограничивается диапазон регулирования частоты вращения.

3. Альтернативой трехмашинным СА могут быть СА, выполненные на базе многополюсных (с большим числом зубцов  $Z$  на статоре) ЭМ с зубцовым шагом обмотки с размещением СД, СГ и ДП на одном магнитопроводе. При этом для размещения обмоток СГ из общего числа зубцов должно быть выделено определенное число (например  $mk$ ) зубцов, свободных от обмоток СД. Кроме того, как правило, выделяют так называемые экранирующие зубцы, на которых нет обмоток ни СД, ни СГ. Но основное предназначение таких СА – это ЭП промышленного назначения (как правило, с МР) с ограниченной полосой пропускания. Так, если ЭП работает в основном в верхней части диапазона частот вращения, то в качестве ИА предпочтительно использовать СА с раздельным размещением обмоток СД и СГ, как в СА № 1 или СА № 4 (с параметрами  $Z=36$ ,  $2p=24$ ), используемым в ЭП катера «Соболь» [25]), при  $k=1, 2, 3$ .

Если ЭП работает в нижней части диапазона частот вращения, то здесь предпочтительнее применить СА с СГ с компенсационными обмотками (как в СА № 2) с большим значением  $k$  ( $k=4, 6$ , например) для повышения момента на валу СД.

4. Что касается ЭРП, то для них целесообразно использовать малогабаритные быстроходные СА с размещением обмоток СД и СГ (для упрощения изготовления СА и повышения значений  $k_M$  и  $c_e$ ) во всех пазах статора (как в СА № 3) при максимально возможном для выбранного  $Z$  значения числа  $k$ . Это обеспечивает малые габариты и массу как СА, так и исполнительного механизма, содержащего СА и МР.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов М.В., Бродовский В.Н., Зимин А.В., Каржавов Б.Н. Электрические следящие приводы с моментным управлением исполнительными двигателями. — М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2006.
2. Каржавов Б.Н. Об управлении моментом исполнительного двигателя в электроприводах. — Электричество, 2011, № 2.
3. Высокоточные системы управления и приводы для вооружения и военной техники/Под ред. В.Л. Солунина. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999.
4. А.с. 186018 (СССР). Способ управления бесколлекторным электроприводом постоянного тока/В.Н. Бродовский, Ю.А. Кузнецов. — БИ, 1966, № 18.
5. Балагуров В.А., Гридин В.М., Лозенко В.К. Бесколлекторные двигатели постоянного тока с постоянными магнитами. — М.: Энергия, 1975.
6. Бутаев Ф.И., Эттингер Е.Л. Вентильный электропривод. — М.; Л.: Госэнергоиздат, 1951.
7. Бродовский В.Н., Каржавов Б.Н. Вентильные приводы с моментным управлением. — Вопросы оборонной техники, 2002, сер. 9, вып. 2.
8. Якименко Н.М. Электромашинный усилитель как элемент регулирующей системы. — Электричество, 1949, № 9.
9. А.с. 284868 (СССР). Способ ускоренного разгона гиromотора/В.Н. Бродовский, А.А. Замброжицкий, Б.Н. Каржавов. — БИ, 1971, № 35 (Приоритет 1965 г.).
10. А.с. 253226 (СССР). Бесконтактный реверсивный регулируемый привод/В.Н. Бродовский, Б.Н. Каржавов, Ю.П. Рыбкин. — БИ, 1969, № 30 (Приоритет 1967 г.).
11. Патент РФ 2112309. Электроагрегат/В.Н. Бродовский, Б.Н. Каржавов, В.П. Петухов, Ю.П. Рыбкин. — БИ, 1998, № 15 (Приоритет 1995 г.).
12. Патент РФ № 2061299 Электропривод/В.Н. Бродовский, А.А. Желябовский, Б.Н. Каржавов и др. — БИ, 1996, № 15 (Приоритет 1993 г.).
13. Бродовский В.Н., Каржавов Б.Н., Рыбкин Ю.П. Бесколлекторные тахогенераторы постоянного тока. — М.: Энергоиздат, 1982.
14. А.с. 186556 (СССР). Способ преобразования сигнала синхронной тахомашины/В.Н. Бродовский, Б.Н. Каржавов, Ю.П. Рыбкин. — БИ, 1966, № 9.
15. А.с. 552663 (СССР). Бесконтактный реверсивный тахогенератор постоянного тока/Б.Н. Каржавов, В.Н. Бродовский, Ю.П. Рыбкин. — БИ, 1997, № 12 (Приоритет 1976 г.).
16. А.с. 978242 (СССР). Привод опорно-поворотного устройства/Б.Н. Каржавов, В.Н. Бродовский, Ю.П. Рыбкин и др. — БИ, 1982, № 44.
17. Пульер Ю.М., Колесов Ю.А., Асиновский Э.Н. Индукционные электромеханические преобразователи. — М.: Энергия, 1969.
18. Патент РФ № 2047936. Синхронный электродвигатель/В.Н. Бродовский, Е.С. Иванов, М.И. Лузин и др. — БИ, 1995, № 31.
19. Лузин М.И. Электрический вентильный двигатель с улучшенными массогабаритными показателями и малым значением момента «залипания» ротора. — Электричество, 2010, № 6.
20. Бродовский В.Н., Зимин А.В., Каржавов Б.Н., Рыбкин Ю.П. Электрические рулевые приводы с синхронными исполнительными двигателями. — Вопросы оборонной техники, 2000, сер. 9, вып. 1 (223).
21. Бродовский В.Н., Зимин А.В., Каржавов Б.Н., Рыбкин Ю.П. Следящие приводы на базе синхронных машин. — Вопросы оборонной техники. 2000, сер. 9, вып. 1 (223).
22. А.с. 1700704 (СССР). Электромеханический преобразователь вентильного электродвигателя/В.Н. Бродовский, Ю.М. Бельский, М.И. Лузин, Н.Н. Мрочковский. — БИ, 1991, № 47.
23. Каржавов Б.Н. Функциональные квазисинусоидальные преобразователи. — М.: НТЦ «Информтехника», 2003.
24. А.с. 878154 (СССР). Бесконтактный реверсивный регулируемый привод постоянного тока/Б.Н. Каржавов, Ю.П. Рыбкин, В.Н. Бродовский и др. — БИ, 2000, № 10 (Приоритет 1976 г.).
25. Патент РФ 2392730. Электрический следящий привод/Б.Н. Каржавов, Н.В. Буторин, В.Н. Бродовский. — БИ, 2010, № 17.

[15.10.12]

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