

# О выборе типа электрических машин для исполнительных агрегатов электрических рулевых приводов летательных аппаратов

КАРЖАВОВ Б.Н.

*Исполненные агрегаты, содержащие исполнительный двигатель, измеритель частоты вращения и датчик положения потока, предназначены для использования в электрических рулевых приводах при управлении моментом исполнительного двигателя. Показаны преимущества синхронных электрических машин с зубцовым шагом обмотки по сравнению с другими типами электрических машин, применяемых в рулевых электроприводах. Приведены результаты разработок исполнительных агрегатов для электрических рулевых приводов летательных аппаратов различного назначения – с длительным и малым временем полета.*

**Ключевые слова:** электрический рулевой привод, летательный аппарат, способ управления моментом, исполнительный агрегат, синхронный двигатель, синхронный генератор, датчик положения

К электрическим рулевым приводам (ЭРП) летательных аппаратов (ЛА) [1] и прежде всего к исполнительным агрегатам (ИА) привода предъявляются жесткие требования. Во-первых, они должны быть компактными и хорошо приспособленными к конструкции отсека ЛА; во-вторых, кроме заданных значений момента  $M$  и частоты вращения  $n$ , должны обеспечивать на своем валу (и в нагрузке) высокое ускорение  $e$  для обеспечения необходимого быстродействия ИА и ЭРП в целом [2].

Для повышения быстродействия в ЭРП используется моментный способ управления (МСУ) исполнительным двигателем [3]. Исполнительный агрегат привода с таким способом управления содержит три устройства – исполнительный двигатель (ИД), измеритель частоты вращения (ИЧВ) и датчик положения потока (ДПП) ИА [4].

Ниже будут рассмотрены вопросы выбора типа электрических машин (ЭМ) и конструкции ИА для применения в ЭРП различных ЛА.

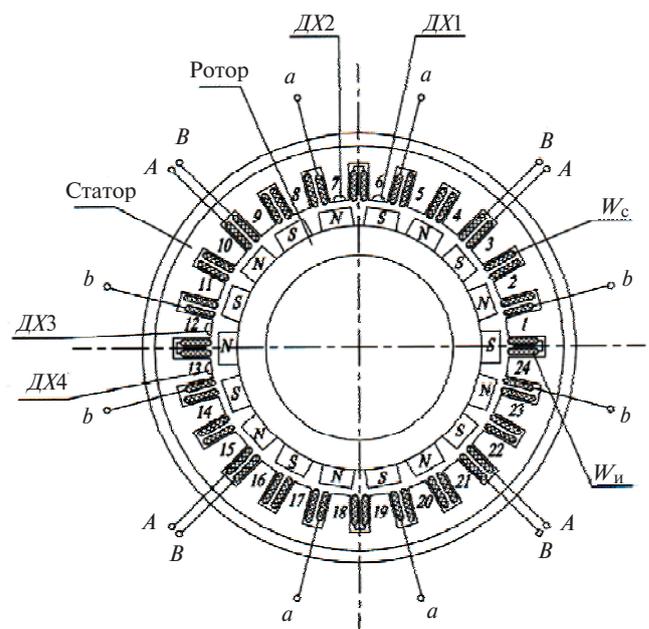
*О выборе ИД для ЭРП.* Предварительно отметим следующее обстоятельство. Как правило, в ЭРП ЛА момент инерции  $J_H$  нагрузки (руля) существенно (почти на порядок) меньше приведенного к рулю момента инерции ротора  $J_p$  ИД [2]. Поэтому заданное ускорение нагрузки  $e_H$  должен обеспечить ИД, разлив соответствующее ускорение  $e_{дв}$  на валу. При этом, если частота вращения  $n_{дв}$  (и  $n_H$ ) зависит от напряжения питания ИД, то вращающий момент  $M_{дв}$  (и  $M_H$ ), а также ускорение  $e_{дв}$  (и  $e_H$ ) определяются конструкцией ИД.

В качестве ИД для ЭРП наиболее рационально использовать синхронный двигатель (СД) с возбуждением от постоянных магнитов с редкоземельными элементами; катушки (секции) обмотки с зубцовым шагом [5] размещены на каждом зубце статора (см. рисунок). Синхронный двигатель обладает большим удельным моментом, высоким бы-

стродействием и хорошими условиями теплоотдачи, на его магнитопроводе могут размещаться и ИЧВ, и ДПП [4]. Кроме того, он имеет наибольшую по сравнению с другими типами электрических машин (ЭМ) добротность [6], которая характеризует статические и динамические качества ИД [5, 2]:

$$D = \frac{M_{\max}}{Gg} e_{\max}, \quad (1)$$

где  $G$  – масса ИД;  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения (введено для обеспечения безразмерности величины  $D$ ).



Исполнительный агрегат с дискретным датчиком положения потока, выполненным на датчиках Холла (ДХ): А, В – выводы силовых обмоток фаз  $W_c$  ИД; а, b – выводы информационных обмоток  $W_{и}$  СГ. Параметры ИА:  $Z=24$ ,  $2p=18$ ,  $m=2$ ,  $k=2$ ,  $N=4$ ; ДХ устанавливаются на зубцах с номерами 6 и 7 для 1-й фазы и 12 и 13 – для 2-й

Расчеты показывают [5], что наибольшую добротность при стандартных размерах листов статора имеют СД с зубцовым шагом обмотки, для которых  $D=200, 300$  (добротность асинхронного двигателя составляет порядка 60, 80). Добротность коллекторного двигателя постоянного тока (ДПТ) даже специальной разработки (на повышенное напряжение и с возбуждением от постоянных магнитов) [1] составляет  $D=52$ , а добротность СД спецразработки для ЭРП может достигать 2000.

Для дальнейших рассуждений выразим величины, входящие в формулу (1), через геометрические размеры ИД [2].

Учитывая, что момент ИД определяется диаметром ротора  $d_p$  и длиной  $L$  магнитопровода ИД, а также числом витков в обмотке  $W$ , т.е. площадью пазов  $S_{\Pi}$  (при одинаковой плотности тока в обмотке), можно записать:

$$M_{\max} \propto d_p L S_{\Pi} \tag{2}$$

Ускорение

$$e_{\max} = \frac{M_{\max}}{J_p} \tag{3}$$

где

$$J_p \propto d_p^4 L \tag{4}$$

— момент инерции ротора, может быть представлено выражением

$$e_{\max} \propto \frac{S_{\Pi}}{d_p^3} \tag{5}$$

тогда

$$D \propto \frac{L S_{\Pi}^2}{d_p^2 G} \tag{6}$$

Поскольку

$$G \propto L_y d_c^2 \propto L d_c^2, \tag{7}$$

где  $d_c$  — диаметр статора;  $L_y$  — условная длина ИД, приблизительно равная для бесколлекторных ИД длине  $L$  магнитопровода статора, а  $S_{\Pi} \propto (d_c - d_p)^2$ ,

то

$$D \propto \frac{(d_c - d_p)^4}{d_c^2 d_p^2} \tag{8}$$

Обычно для стандартных ИД малой мощности отношение  $d_c / d_p$  — величина примерно постоянная и для рассматриваемых СД равная 0,55, 0,58, поэтому можно положить

$$d_c - d_p = d_c \xi \left(1 - \frac{d_p}{d_c} \right) = d_c \epsilon, \tag{9}$$

тогда

$$D \propto c^4 \frac{d_c^2}{d_p^2} \frac{\xi d_c}{\xi d_p} \frac{\delta^2}{\delta} \tag{9}$$

Таким образом, добротность ИД ( в том числе и СД) при одинаковых значениях индукции в магнитопроводе и плотности тока в обмотках статора определяется отношением диаметров статора и ротора, и чем это соотношение больше, тем выше добротность. При этом, если ИД обеспечивает заданный момент на валу, но не обеспечивает необходимого ускорения, то следует либо уменьшить диаметр ротора [см. формулу (5)], но одновременно увеличить длину ИД [см. формулу (2)] для сохранения значения момента, либо увеличить диаметр статора (значение  $S_{\Pi}$ ), уменьшив соответствующим образом длину ИД. В том случае, когда ИД развивает необходимое ускорение, но не обеспечивает заданного момента, достаточно увеличить длину ИД в соответствии с (2).

При определении значений основных параметров ( $M, n, \epsilon$ ) ИД и заданном значении установленной мощности  $P_{\max}$  следует учитывать, что в целях уменьшения массы и габаритов в качестве ИД для ЭРП используют высокоскоростные СД с повышенной частотой  $f$  питающего напряжения и, как правило, небольшим числом пар полюсов ( $p \leq 6$ ).

Для согласования параметров ИД и нагрузки в ЭРП применяют механический силовой редуктор (СР) с коэффициентом редукции

$$i = \frac{n_{\text{ДВ.ХХ}}}{n_{\text{Н.ХХ}}} \tag{10}$$

Учитывая, что

$$n_{\text{ДВ.ХХ}} = \frac{n_{\text{ЭМ}}}{p}, \tag{11}$$

где  $n_{\text{ЭМ}}$  — частота вращения магнитного поля СД (поскольку  $p$  по существу есть коэффициент электромагнитной редукции частоты вращения в СД), можно записать

$$i = \frac{n_{\text{ЭМ}}}{p n_{\text{Н.ХХ}}} \tag{12}$$

В общем случае для уменьшения коэффициента редукции  $i$  (в целях улучшения массогабаритных показателей СР) следует увеличивать число пар полюсов  $p$  в СД. Это целесообразно еще и потому, что при этом увеличивается значение момента  $M_{\text{ДВ}}$ , так как

$$M_{\text{ДВ}} = p M_{\text{ЭМ}}, \tag{13}$$

где  $M_{\text{ЭМ}}$  — момент, создаваемый электромагнитным полем, а также увеличиваются удельный момент и ускорение ИД, т.е. повышается добротность.

Однако в ЭРП предпочитают не изменять значение коэффициента редукции при увеличении

числа  $p$ , а уменьшать момент  $M_{\text{ЭМ}}$ , сократив, например, длину СД [см. формулу (2)], а для обеспечения заданной мощности  $P_{\text{ЭМ}} = M_{\text{ЭМ}} n_{\text{ЭМ}}$  пропорционально увеличивать значение  $n_{\text{ЭМ}}$ , т.е. повышать частоту питающего напряжения

$$f = \frac{n_{\text{ЭМ}}}{60} = \frac{pin_{\text{н.хх}}}{60}.$$

Отметим, что значение частоты  $f_{\text{max}}$  ограничено потерями в стали и допустимой частотой вращения ИД, иногда для ее ограничения приходится изменять коэффициент редукции  $i$  СР.

Уменьшение длины СД, кроме увеличения  $D$  и  $\epsilon$ , улучшает массогабаритные показатели (что для ЭРП с СР может быть определяющим) и уменьшает потери в меди за счет укорочения длины витка обмотки. Последнее уменьшает нагрев ИД, что либо продлевает время его работы, либо дает возможность повысить плотность тока в обмоточных проводах и момент двигателя.

Следует сказать, что в СД с зубцовым шагом обмотки при заданном числе зубцов  $Z$  на статоре число полюсов  $2p$  на роторе не может быть выбрано произвольно. Оно зависит от чисел фаз  $m$  и зубцов  $k$  в фазовой группе и определяется выражением [5]:

$$2p = Z \frac{km - 1}{km}. \quad (14)$$

Отметим, что произведение  $km$  определяет фазовый угол  $Dj$  между напряжениями на секциях обмотки, размещенных на соседних зубцах статора.

Действительно, угловое расстояние зубцов  $Dj_{\text{с}} = 360/Z$ , угловое расстояние полюсов  $Dj_{\text{р}} = 360/2p$ , следовательно, разность фаз напряжений

$$Dj = \frac{360}{2p} - \frac{360}{Z} = 180 \frac{Z - 2p}{pZ}$$

или с учетом коэффициента редукции, равного  $p$ ,

$$Dj_{\text{эл}} = 180 \frac{Z - 2p}{Z} = 180 \left( 1 - \frac{2p}{Z} \right)$$

Поскольку из (14)

$$\frac{2p}{Z} = \frac{km - 1}{m} = 1 - \frac{1}{km},$$

то

$$Dj_{\text{эл}} = \frac{180}{km}.$$

При этом число фаз в СД выбирается чаще всего исходя из схемы усилителя мощности (УМ), поскольку мощность ИД

$$P = m U_{\text{ф}} I_{\text{ф}} \quad (15)$$

от числа фаз в общем случае не зависит, а определяется суммарным числом витков, размещающихся в пазах статора  $W_{\text{ст}} \circ S_{\text{п}}$ .

Число витков в фазовой обмотке  $W_{\text{ф}}$  и, соответственно, напряжение фазы  $U_{\text{ф}}$  будут пропорциональны значению величины  $W_{\text{ст}}/m$ , т.е.

$$U_{\text{ф}} = c_{\text{ф}} W_{\text{ф}} = c_{\text{ф}} \frac{W_{\text{ст}}}{m}. \quad (16)$$

Тогда с учетом (15) мощность ИД

$$P = c_{\text{ф}} W_{\text{ст}} I_{\text{ф}} (\circ S_{\text{п}} I_{\text{ф}}). \quad (17)$$

Значение  $k$  в (14) выбирают исходя либо из желаемого числа полюсов ( $2p$ ), либо из структуры датчика положения (ДП) ротора СД.

*О выборе измерителя частоты вращения.* Для измерения частоты вращения ИА чаще всего используют синхронный генератор (СГ), который идеально подходит для этого [7, 4], так как у него отсутствуют зона нечувствительности и нулевой фон; выходная характеристика имеет большую крутизну и высокую линейность; форма выходного напряжения практически синусоидальна [7].

При этом наиболее целесообразно использовать СГ с зубцовым шагом обмотки [5], так как, во-первых, обладая всеми перечисленными достоинствами, он имеет наибольшую удельную крутизну и, во-вторых, хорошо сочетается с СД с зубцовым шагом обмотки. Последнее и даёт возможность объединить СД и СГ в ИА, разместив обмотки  $W_{\text{с}}$  СД и  $W_{\text{и}}$  СГ (см. рисунок) на едином магнитопроводе, образовав синхронный агрегат (СА). Обмотки могут занимать все пазы статора ИА, а иногда — наматываться в параллель, например, в высокоскоростных СА [2] с малым значением взаимной индуктивности  $L_{\text{гд}}$  обмоток СГ и СД. Часто для уменьшения значения  $L_{\text{гд}}$  обмотки  $W_{\text{и}}$  и  $W_{\text{с}}$  размещают в разных пазах [5], но и в том, и в другом случаях они находятся на едином магнитопроводе СА.

*О построении датчика положения потока СА.* Как правило, в ИА ЭРП применяют дискретные ДПП, построенные на датчиках Холла (ДХ), которые являются регистраторами наличия или отсутствия магнитного потока определенного направления. Поэтому при вращении СА на выходе ДХ появляется электрический сигнал прямоугольной формы [4], который используется в электронной схеме для управления ключами преобразующих устройств. Датчики Холла выпускаются в виде микросхем, которые размещаются чаще всего в зазоре СА, обычно на зубцах статора СА. Количество  $N$  ДХ в СА определяется числом зубцов  $k$  в фазовой группе и выбирается не менее  $N = 3$  для значения  $m = 3$  и не менее  $N = 4$  для  $m = 2$ .

В заключение отметим, что рассмотренные ИА были спроектированы для ЭРП различного назна-

чения. Так, для ЛА с длительным временем полёта был разработан ЭРП с ИА, имевшем следующие параметры:  $Z=12$ ,  $2p=10$ ,  $m=3$ ,  $k=2$ ,  $N=6$ . Исполнительный агрегат обеспечивал на валу вращающийся момент  $M=0,83$  Нж, частоту вращения  $n=1800$  об/мин, ускорение  $\epsilon=10^4$  рад/с<sup>2</sup>. Добротность ИА составила  $D=150$ .

Отметим, что столь малое значение  $D$  обусловлено конструкцией ИА, в ротор которого был встроены СР в виде шариковинтовой пары (ШВП) [5], что увеличило диаметр ротора и его момент инерции. Такая конструкция ИА была определена конфигурацией выделенного для ЭРП места в отсеке (ИА и колонка руля были разнесены друг от друга).

Для ЭРП малогабаритного ЛА с малым временем полёта были разработаны ИА с большой форсировкой по скорости, что значительно сократило массу и габариты ИА. Этому способствовало и специальное конструктивное решение СА: он был выполнен четырехполюсным с сильно развитым (отношение  $d_p/d_c=0,33$ ) шестизубцовым статором [5]. При напряжении питания СД имел следующие параметры:  $M_m=0,3$  Нж,  $n_{xx}=9000$  об/мин,  $\epsilon=110 \times 10^3$  рад/с<sup>2</sup>. Масса встраиваемой конструкции — 0,4 кг, добротность  $D=840$ . При сильной форсировке ( $I_c=30$  А) двигатель может кратковременно обеспечить  $M_m=0,8$  Нж,  $n_{xx}=9000$  об/мин,  $\epsilon=170 \times 10^3$  рад/с<sup>2</sup>,  $D=1900$  [2].

*Elektrichestvo (Electricity), 2015, No. 2, pp. 60–63.*

## On Selecting the Type of Electrical Machines for the Actuators of Electrical Drives of Aircraft Rudders

B.N. KARZHAVOV

*Actuators containing an actuating motor, a rotation frequency meter, and a flux position sensor are intended for use in rudder electric drives in controlling the actuating motor torque. The advantages of synchronous electrical machines with a tooth winding pitch over other types of electrical machines used in rudder electric drives are shown. The results of works on designing the actuators for rudder electric drives of aircrafts for different purposes with a short- and long-time flight are presented.*

*Key words: rudder electric drive, aircraft, torque control method, actuator, synchronous motor, synchronous generator, position sensor*

### REFERENCES

1. *Vysokotочные системы управления и приводы для вооружения и военной техники/Под ред. V.L. Solunina* (High-precision control systems and drives for arms and military equipment/Edit by V.L. Solunin). Moscow, Publ. of the Bauman Moscow State Technical University, 1999, 368 p.
2. *Brodovskii V.N., Zimin A.V., Karzhavov B.N., Rybkin Yu.P. Voprosy oboronnoy tekhniki (Problems of Defence Technics)*, 2000, ser. 9, iss. 1(223), pp. 18–21.
3. *Karzhavov B.N. Elektrichestvo (Electricity)*, 2011, No. 2, pp. 39–45.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Высокоточные системы управления и приводы для вооружения и военной техники/Под ред. В.Л. Солунина*. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999, 368 с.
2. *Бродовский В.Н., Зимин А.В., Каржавов Б.Н., Рыбкин Ю.П. Электрические рулевые приводы с синхронными исполнительными двигателями*. — М.: НТЦ «Информтехника». Вопросы оборонной техники, 2000, сер. 9, вып. 1 (223), с. 18–21.
3. *Каржавов Б.Н. Об управлении моментом исполнительного двигателя в электроприводах*. — *Электричество*, 2011, № 2, с. 39–45.
4. *Каржавов Б.Н. Построение синхронных агрегатов для электроприводов с управлением моментом исполнительного двигателя*. — *Электричество*, 2013, № 4, с. 31–38.
5. *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, 240 с.
6. *Карасев В.А. Новые системы малоинерционных исполнительных двигателей постоянного тока*. — *Электротехника*, 1970, № 8, с. 4–7.
7. *Бродовский В.Н., Каржавов Б.Н., Рыбкин Ю.П. Бесколлекторные тахогенераторы постоянного тока*. — М.: Энергия, 1982, 129 с.

[08.09.14]

*Авторы: Каржавов Борис Николаевич окончил радиотехнический факультет Московского электротехнического института связи в 1957 г. В 1990 г. защитил докторскую диссертацию «Приборы и устройства систем управления и специальных электроприводов». Главный научный сотрудник Центрального научно-исследовательского института авионики и гидравлики.*

4. *Karzhavov B.N. Elektrichestvo (Electricity)*, 2013, No. 4, pp. 31–38.

5. *Baranov M.V., Brodovskii V.N., Zimin A.V., Karzhavov B.N. Elektricheskiye sledyashchiye privody s momentnym upravleniyem ispolnitel'nymi dvigatelyami* (Electric servo drives equipped with torque-controlled actuator motors). Moscow, Publ. of the Bauman Moscow State Technical University, 2006, 240 p.

6. *Karasev V.A. Elektrotekhnika (Power Engineering)*, 1970, No. 8, pp. 4–7.

7. *Brodovskii V.N., Karzhavov B.N., Rybkin Yu.P. Beskollektornyye takhogeneryatory postoyannogo toka* (Collectorless DC tachogenerators). Moscow, Publ. Energiya, 1982, 129 p.

*Author: Karzhavov Boris Nikolayevich (Moscow, Russia) — Doctor Techn. Sci., Chief Scientific Researcher, the Central Research Institute of Automatics and Hydraulics.*

