

## ВЕНТИЛЬНЫЕ ДВИГАТЕЛИ С ЗУБЦОВЫМ И ГЛАДКИМ ЯКОРЕМ ДЛЯ ВЫСОКОТОЧНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

---

Анатолий Николаевич ГЕРАЩЕНКО родился в 1949 г. в городе Ессентуки Ставропольского края. Ректор МАИ. Доктор технических наук, профессор. Основные научные интересы — в области интегрированных систем летательных аппаратов. Автор более 80 научных работ. E-mail: aet@mai.ru

Anatoly N. GERASHCHENKO, D.Sci., was born in 1949, in the Stavropol Region. He is the Rector at the MAI. His main research interests are in integrated aircraft equipment systems. He has published more than 80 technical papers. E-mail: aet@mai.ru

---

Николай Иванович КУЛИКОВ родился в 1946 г. на острове Гогланд Ленинградской области. Профессор МАИ. Доктор биологических наук, кандидат технических наук, профессор. Основные научные интересы — в области мехатроники, систем приводов летательных аппаратов. Автор более 100 научных работ. E-mail: nik@mai.ru

Nickolay I. KULIKOV, D.Sci., was born in 1946, in the Leningrad Region. He is a Professor at the MAI. His main research interests are in mechatronics, aircraft driving systems. He has published over 100 technical papers. E-mail: nik@mai.ru

---

Андрей Евгениевич СОРОКИН родился в 1971 г. в городе Днепродзержинске. Помощник ректора МАИ. Основные научные интересы — в области систем приводов летательных аппаратов. Автор 15 научных работ. E-mail: sorokin@mai.ru

Andrey E. SOROKIN, was born in 1971, in Dneprodzerzhinsk. He is an Assistant of the Rector at the MAI. His research interests are in aircraft driving systems. He has published 15 technical papers. E-mail: sorokin@mai.ru

---

Нина Павловна СТАРОВОЙТОВА в городе Москве. Доцент МАИ. Кандидат технических наук, доцент. Основные научные интересы — в области математического моделирования и методов расчета электрических машин. Автор более 50 научных работ. E-mail: nik@mai.ru

Nina P. STAROVOYTOVA, Ph.D., was born in Moscow. She is an Associate Professor at the MAI. His research interests are in mathematical modeling and analysis techniques for electrical machines. She has published over 50 technical papers. E-mail: nik@mai.ru

---

*На основе комплексного подхода проводится сравнительный анализ вентильных двигателей с зубцовым и гладким якорем по их удельным показателям.*

*An integrated comparative analysis is carried out to reveal specific indexes for converter-fed motors with slotted and smooth-core armature.*

**Ключевые слова:** вентильный двигатель, удельные показатели электродвигателей, высокоточный электропривод, математическое моделирование.

**Key words:** converter-fed motor, specific indexes for electric motors, high-precision electric drive, mathematical modeling.

Высокоточный электропривод широко применяется в станках с числовым программным управлением (ЧПУ), в оборудовании для производства полупроводников, в приводах механизмов вращения антенн и оптико-механических комплексов, в медицинском оборудовании, в быстродействующем оборудовании для монтажа микросхем и других областях техники. Современные технологические

процессы предъявляют новые требования к прецизионным приводам. В настоящее время большое внимание ученых уделено разработке прямых (безредукторных) приводов [1-5]. Это связано, прежде всего, с такими преимуществами прямых приводов, как лучшие по сравнению с редукторными приводами точностные и динамические параметры, а также более высокая надежность.

Вентильные двигатели (ВД) благодаря своим уникальным характеристикам зачастую являются наиболее предпочтительными в высокоточном электроприводе. Перспективы их использования обусловлены рядом преимуществ перед другими типами электрических машин постоянного и переменного тока:

- наилучшие среди всех типов электродвигателей массо-габаритные и энергетические показатели;
- жесткость механической характеристики и простота регулирования;
- высокое быстродействие в переходных процессах;
- большой срок службы, в том числе за счет повышения срока службы подшипников из-за резкого снижения их нагрева;
- высокая перегрузочная способность по моменту (кратность максимального момента более 3—5);
- широкий диапазон регулирования частоты вращения, возможность регулирования частоты вращения по различным законам.

Вместе с тем сложность реализации высокоточного электропривода на базе классического вентильного двигателя со 120-градусной коммутацией заключается в наличии пульсаций электромагнитного момента, величина которых может достигать 20—30 % от номинального момента двигателя. При относительно больших частотах вращения указанное колебание момента в пределах одного оборота не приводит к заметным колебаниям мгновенной скорости, особенно при наличии инерционной нагрузки. Однако для устойчивой работы электропривода на «ползучих» скоростях вращения требования к обеспечению постоянства момента на валу электродвигателя резко возрастают.

Из классической теории синхронных машин известно, что постоянный момент на роторе можно обеспечить неизменным по величине результирующим полем якоря, сохраняющим постоянное угловое положение по отношению к индуктору [1, 2, 4]. То есть для обеспечения постоянства электромагнитного момента необходимо выполнить следующие условия:

- 1) эквивалентная магнитодвижущая сила (МДС) якоря должна поддерживаться на постоянном уровне;
- 2) электродвигатель должен быть максимально приближен к идеальной синхронной машине, питаемой от источника синусоидального тока, с потяжением фаз, изменяющимся по гармоническому закону;
- 3) угол нагрузки  $\Theta$  должен оставаться неизменным. Рационально поддерживать угол нагрузки

$\Theta = 90^\circ$ , для которого при фиксированном токе якоря обеспечивается максимальный момент.

Дополнительным требованием является минимизация знакопеременных зубцовых моментов, значение которых у большинства электродвигателей с постоянными магнитами достигает десятков процентов от номинального момента, что существенно влияет на плавность хода при ползучих скоростях вращения.

Таким образом, основные требования к электродвигателю для электропривода с высокоточным регулированием параметров можно сформулировать следующим образом:

- электродвижущая сила (ЭДС) электродвигателя не должна содержать в своем составе высших гармоник;
- амплитуда пульсаций момента, обусловленных зубчатой структурой якоря, должна быть минимальной.

Проблемы с синусоидальным полем в зазоре и зубцовыми пульсациями момента решает весьма технологичная и простая в изготовлении беспазовая конструкция статора (гладкий якорь). Отсутствие зубцов на статоре исключает зубцовые пульсации, а естественным образом распределенная обмотка в совокупности с относительно большим воздушным зазором при использовании многополюсного кольцевого магнита обеспечат требуемый гармонический состав кривой ЭДС.

Однако именно большой рабочий зазор может привести к существенному ухудшению массо-габаритных показателей двигателя.

Для корректного сравнения двигателей различного исполнения используют, как правило, их удельные характеристики.

Выбор наилучшей с точки зрения массо-габаритных показателей или любого другого критерия схемы активной зоны возможен лишь при решении задачи сравнительного анализа различных конструктивных схем ВД, причем внутри каждой конструктивной схемы двигатель должен быть оптимальным с точки зрения достижения экстремума целевой функцией.

При сравнении двигателей по удельному моментному показателю фиксируют момент  $M$  на валу двигателя или объема — активный  $V_{\text{акт}}$ , ограниченный наружным диаметром якоря и расчетной длиной машины, или полный  $V$  с учетом длины лобового вылета обмотки якоря (ОЯ).

По собственным параметрам быстродействия наиболее обоснованным является сравнение двигателей при фиксированном моменте на валу. Фиксация  $M$  целесообразна при оптимизации ВД по удельному моментному показателю, так как не

только позволяет произвести сравнение машин по относительным показателям, но и обеспечивает одновременно достоверное сравнение по габаритным размерам.

Оставив в стороне вопрос сравнения ВД с индуктором «коллекторного» типа, осуществим сравнение ВД с индуктором типа «сборная звездочка» при зубцовом и «гладком» якоре.

В основу исследований положено выражение для среднего значения момента ВД, предложенное в [6]:

$$M = \beta \cdot k_o \cdot p \cdot \Phi \cdot I \cdot w,$$

где  $\Phi$  — магнитный поток в рабочем зазоре;  $p$  — число пар полюсов индуктора;  $I$  — среднее значение тока двигателя;  $w$  — число витков фазы обмотки якоря;  $k_o$  — коэффициент обмотки;  $\beta$  — коэффициент, зависящий от конструктивной схемы двигателя, числа фаз  $m$  и схемы соединения фаз обмотки якоря.

Учитывая, что

$$I \cdot w = j \cdot \frac{Q_o}{2 \cdot m} \cdot k_{3,0},$$

где  $j$  — плотность тока в обмотке якоря;  $Q_o$  — площадь, занятая обмоткой якоря,  $k_{3,0}$  — коэффициент заполнения окна медью, выражения для момента можно записать в виде

$$M = k \cdot p \cdot j \cdot \Phi \cdot Q_o,$$

где  $k = \beta \cdot k_o \cdot k_{3,0} / 2 \cdot m$ .

Переход к такой форме обеспечивает определение момента в функции геометрических размеров и конструктивных параметров.

Для различных конструктивных схем ВД выражения для  $\Phi$ ,  $Q_o$ ,  $j$ , определяющих значение момента, записываются по-разному. Однако посредством введения понятий базового и расчетных значений геометрических размеров для всех них возможна единая форма записи:

$$M = k \cdot p \cdot C_Q \cdot C_{\Phi_0} \cdot (1 - F_{adh*}) \cdot j \cdot D_{баз}^4,$$

где

$$C_{\Phi_0} = \frac{\Phi_0}{D_{баз}^2} = \frac{B_r \cdot \frac{\pi \cdot \alpha_i}{2 \cdot p} \cdot \lambda \cdot D_{up*} \cdot D_{яp*}}{\mu_{\sigma*} \cdot k_{\mu} \cdot \delta_{p*} / h_{mp*} + k_{\sigma} \cdot \frac{\pi \cdot \alpha_i}{2 \cdot p} \cdot D_{яp*} / b_{mp*}};$$

$F_{adh}$  — относительное значение МДС реакции якоря;  $\Phi_0$ ,  $B_{\delta}$  — магнитный поток и индукция в ра-

бочем зазоре без учета реакции якоря;  $\alpha_i$  — расчетный коэффициент полюсного перекрытия;  $\lambda$  — конструктивный коэффициент;  $k_{\mu}$ ,  $k_{\sigma}$  — коэффициент насыщения магнитной цепи и коэффициент рассеяния соответственно;  $\mu_{\sigma*}$  — относительное значение коэффициента возврата кривой размагничивания магнита ( $\mu_{\sigma*} = \mu_{\sigma} / \mu_0$ );  $\delta_{p*} = \delta_p / D_{баз}$  — относительное значение расчетного зазора;  $h_{mp*}$ ,  $b_{mp*}$  — относительное значение высоты и ширины магнита ( $h_{mp*} = h_m / D_u$ ,  $b_{mp*} = b_m / D_u$ ,  $D_u$  — диаметр индуктора);

$$D_{up*} = \frac{D_{up}}{D_{баз}}; \quad D_{яp*} = \frac{D_{яp}}{D_{баз}}.$$

Для зубцовых ВД  $D_{яp} = D_{я}$ , для гладких

$D_{яp} = \frac{D_{я} + D_u}{2}$ , где  $D_{я}$ ,  $D_u$  — диаметр расточки якоря и диаметр индуктора соответственно;

$Q_o$  — площадь, занятая обмоткой якоря двигателя.

За базовый диаметр  $D_{баз}$  принят наружный диаметр якоря для зубцовых машин и диаметр расточки якоря для «гладких».

Входными параметрами являются:

— характеристики материалов:

$B_r$ ,  $H_c$  — магнитов;

$B_z$ ,  $H_z$ ,  $B_{я}$ ,  $H_{я}$ ,  $\lambda_{я}$ ,  $\sigma$  — материала магнитопровода якоря;

$\rho_m$ ,  $\alpha_m$ ,  $\lambda_m$  — меди ОЯ;

коэффициенты удельной теплопроводности компаунда  $\lambda_k$ , пазовой изоляции  $\lambda_{из}$ , обмотки якоря  $\lambda_o$ ;

— температура окружающей среды  $t_{cp}$ ;

— допустимое превышение температуры в обмотке якоря над температурой окружающей среды

$\Delta\Theta_{оя}$ ;

— число фаз  $m$  ОЯ;

— коэффициенты  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $k_R$ , определяемые числом фаз, схемой соединения ОЯ и формой ЭДС;

— число слоев обмотки якоря  $k_{сл}$ ;

— обмоточный коэффициент  $k_o$ ;

— коэффициент заполнения окна медью  $k_{3,0}$ ;

— коэффициент воздушного зазора  $k_{\delta}$ ;

- коэффициент полюсного перекрытия  $\alpha$ ;
- конструктивный коэффициент  $\lambda$ ;
- число пар полюсов индуктора  $p$ ;
- относительный (по отношению к диаметру индуктора) зазор:

рабочий  $\delta_*$  — для зубцовых ВД,

воздушный  $\delta_{o*}$  — для ВД с гладким якорем;

— относительный диаметр индуктора  $D_{up*}$  (по отношению к базовому диаметру);

— базовый диаметр  $D_{баз}$ ;

наружный  $D_n$  для зубцовых машин,

по расточке якоря  $D_я$  для машин с гладким якорем.

Объем двигателя можно определить как

$$V = C_V \cdot D_{баз}^3,$$

где для машин с гладким якорем

$$C_V = \frac{\pi}{4} \cdot (1 + 2 \cdot h_{я*})^2 \times \left\{ \frac{\pi}{2 \cdot p \cdot k_{cl}} + D_{up*}^2 \cdot \left[ \lambda + \frac{\pi \cdot (1 + 2 \cdot \delta_{o*})}{2 \cdot p \cdot k_{cl}} \right] \right\},$$

а для машин с зубцовым якорем

$$C_V = \frac{\pi}{4} \cdot \left\{ \frac{\pi}{2 \cdot p \cdot k_{cl}} + D_{up*} \times \left[ \lambda + \frac{\pi \cdot (1 + 2 \cdot \delta_* + b_{z*} - 2 \cdot h_{я*})}{2 \cdot p \cdot k_{cl}} - 2 \cdot \frac{b_{z*} \cdot m}{k_{cl}} \right] \right\};$$

$k_{cl}$  — число слоев обмотки якоря;  $h_{я*}$ ,  $b_{z*}$  — относительные значения высоты ярма и ширины зубца соответственно.

С учетом изложенного удельный момент двигателя определяется как

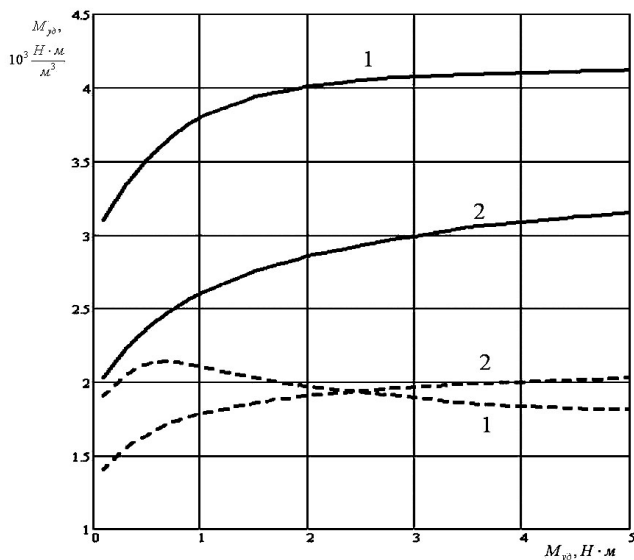
$$M_{y\partial} = k \cdot p \cdot \frac{C_Q \cdot C_{\Phi 0}}{C_V} \cdot (1 - F_{adh*}) \cdot j \cdot D_{баз}.$$

Полученное выражение для  $M_{y\partial}$  и определяющих его параметров имеют единообразную форму записи для различных конструктивных схем двигателя и при выбранных материалах зависит лишь от геометрических размеров и конструктивных параметров.

При таком подходе выходными параметрами являются удельный момент  $M_{y\partial}$ , электромагнитные ( $A \cdot B_\delta$ ) и тепловые ( $A \cdot j$ ) нагрузки (здесь  $A$  — ли-

нейная нагрузка,  $B_\delta$  — индукция в зазоре без учета реакции якоря,  $j$  — плотность тока в обмотке якоря).

Для проведения корректного сравнения ВД различных конструктивных схем по удельному моменту были проведены оптимизационные расчеты со следующими параметрами оптимизации: число пар полюсов двигателя, коэффициент полюсного перекрытия, конструктивный коэффициент, расчетный относительный диаметр индуктора. Расчеты проводились для трехфазных ВД с естественным и принудительным охлаждением при моменте на валу, изменяющемся в диапазоне 0,1–5 Нм и частоте вращения ротора 5000 об/мин. На рисунке приведены расчетные зависимости максимально достижимого удельного момента от момента на валу (1 — результаты, полученные для двигателей с зубцовым якорем; 2 — для двигателей с гладким якорем).



Максимально достижимый удельный момент:

— — — принудительная вентиляция;

- - - - естественное охлаждение;

1 — двигатели с зубцовым якорем; 2 — двигатели с гладким якорем

Из приведенных зависимостей видно, что при естественном охлаждении ВД с зубцовым якорем превосходят по удельному моменту ВД с гладким якорем лишь при малых значениях момента. С увеличением момента машины с гладким якорем превосходят ВД с зубцовым якорем на 10–20%.

Однако при использовании принудительной вентиляции зубцовые ВД превосходят «гладкие» на (60–90)% при малых моментах и (30–45)% при моменте 5 Нм и более.

Расчетные исследования, проведенные для тихоходных ВД, работающих на «ползучих» скоростях, когда потери в стали становятся пренебрежимо малыми, показали, что удельный момент зубцовых двигателей превосходит удельный момент двигателей с гладким якорем в два раза и более.

#### Выводы

Таким образом, быстроходные ВД с гладким якорем по удельным показателям превосходят зубцовые лишь при отсутствии принудительного охлаждения. Что же касается двигателей, работающих на ползучих скоростях (моментные двигатели), то, безусловно, предпочтительней являются машины с зубцовым якорем.

#### Библиографический список

1. *Овчинников И.Е.* Вентильные электрические двигатели и привод на их основе. — СПб.: Корона-Век, 2007.
2. *Беленький Ю.М., Зеленков Г.С., Микеров А.Г.* Опыт разработки и применения бесконтактных моментных приводов. — Л.: ЛДНТП, 1987.

3. *Епифанов О.К.* Современные электромеханические устройства безредукторных вентильных электроприводов // Докл. науч.-практ. семинара «Электропривод с вентильными двигателями». М.: ИД МЭИ, 2007.

4. *Балковой А.П., Цаценкин В.К.* Прецизионные электроприводы с вентильными двигателями // Докл. науч.-практ. семинара «Электропривод с вентильными двигателями». М.: ИД МЭИ, 2007.

5. *Козаченко В.Ф.* Основные тенденции развития встроенных систем управления двигателями и требования к микроконтроллерам // CHIP NEWS. 1999. № 1. С. 2-9.

6. *Куликов Н.И.* Некоторые вопросы проектирования и расчета вентильных двигателей постоянного тока // Машинно-вентильные системы, коммутация коллекторных электрических машин: Межвузовский сборник научных трудов. Куйбышев, 1981.

Московский авиационный институт

Статья поступила в редакцию 10.09.2009