

УДК 621.313.29-83

В.В. Булгар, канд. техн. наук, проф.
Д.А. Ивлев, инженер,
Одес. нац. политехн. ун-т

ПРИМЕНЕНИЕ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА С БЕЗОБМОТОЧНЫМ РОТОРОМ В НИЗКОСКОРОСТНЫХ БЕЗРЕДУКТОРНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ

В.В. Булгар, Д.А. Ивлев. **Застосування двигунів постійного струму з безобмотковим ротором в низькошвидкісних безредукторних електроприводах.** Подано аналіз впливу на якісні параметри електропривода понижуючого редуктора. Описано конструктивні заходи щодо створення альтернативних безредукторних приводів на базі спеціальних низькошвидкісних двигунів постійного струму з безобмотковим ротором (ДПСБР). На основі аналізу впливу вибраних значень електромагнітних параметрів показано можливість розробки та виготовлення низькооборотних ДПСБР з високим значенням КПД при варіюванні значенням величини щільності струму обмотки якоря.

В.В. Булгар, Д.А. Ивлев. **Применение двигателей постоянного тока с безобмоточным ротором в низкоскоростных безредукторных электроприводах.** Представлен анализ влияния на качественные параметры электропривода понижающего редуктора. Описаны конструктивные меры по созданию альтернативных безредукторных приводов на базе специальных низкоскоростных двигателей постоянного тока с безобмоточным ротором (ДПТБР). На основе анализа влияния выбранных значений электромагнитных параметров показана возможность разработки и изготовления низкооборотных ДПТБР с высоким значением КПД при варьировании значением величины плотности тока обмотки якоря.

V.V. Bulgar, D.A. Ivlev. **Substantiation of application prospects for direct-current motors with a windingless rotor in low-speed gearless electric drives.** A brief analysis of the impact of a gear box on the qualitative characteristics of an electric drive is presented. Practicable design measures intended to develop alternative gearless drives based on special low-speed d.c. motors with a windingless rotor (DCMWR) are described. Based on the analysis of the influence of the chosen values of electromagnetic parameters, engineering feasibility of low-speed DCMWR with a specified high efficiency value is shown. It is achieved by varying the current density of an armature winding.

Значительную долю производимой в мире электроэнергии (по некоторым оценкам до 70%) потребляет электропривод промышленных установок. В связи с этим во всем мире, прежде все-

го в США и Европейском Союзе, на законодательном уровне закрепляются требования по экономии электроэнергии (увеличению КПД) для производителей электроприводов. Как известно, наибольшим КПД обладают высокоскоростные двигатели, но многие механизмы, для которых создается электропривод (конвейеры, лебедки, прессы, мешалки и т.д.), обычно требуют относительно низких частот вращения или скоростей перемещения. Традиционным решением, применяемым для обеспечения низких частот вращения рабочих механизмов, является высокоскоростной двигатель с редуктором. При этом редуктор вносит в привод не только свою массу, объем и момент инерции, но и люфты, которые в процессе эксплуатации увеличиваются и тем самым влияют на динамику привода и его точность. Все это в конечном итоге приводит к снижению КПД всего механизма и его удорожанию, так как с увеличением мощности привода цена редуктора становится заметно выше цены самого двигателя [1]. Поэтому рассмотрение главной альтернативы – безредукторных электроприводов (т.е. электродвигателей, непосредственно связанных с рабочим механизмом) представляет существенный практический интерес. Безредукторный привод имеет неоспоримые достоинства, такие как высокая динамика, высокая статическая и динамическая точность, упрощенное техническое обслуживание и сохранение основных параметров привода неизменными в течение всего срока эксплуатации. Но при этом безредукторный привод, учитывая сказанное, должен иметь высокий КПД и относительно небольшие массу и габариты. Одним из вариантов решения этой проблемы для приводов мощностью от 100 кВт может стать производство классических машин постоянного тока с низкими оборотами. В промышленных каталогах таких крупных производителей электроприводов как ABB и Siemens, можно увидеть двигатели постоянного тока мощностью 100 и 300 кВт с частотой вращения 80 об/мин. Приводы постоянного тока, благодаря простой системе управления, широкому и плавному регулированию скорости вращения, переживают своеобразный ренессанс. Например, в Германии, которая является одной из основных стран-производителей электроприводов, фиксируют рост объема продаж двигателей постоянного тока для промышленного применения [2]. Однако создание машины большой мощности с цилиндрическим ротором классической конструкции при относительно малой частоте вращения якоря невозможно, т.к. связано с ростом длины якоря при увеличении мощности и, как следствие, снижением его прочности [3].

Указанные недостатки отсутствуют у торцевых электрических машин, поскольку эти машины имеют малые осевые размеры. При этом при больших наружных диаметрах такие двигатели имеют высокое значение развиваемого момента благодаря его кубической зависимости от средней величины диаметра кольцевого сердечника неподвижного магнитопровода якоря [4].

Целью данной статьи является обоснование перспективности применения двигателей постоянного тока с безобмоточным ротором (ДПТБР), которые являются разновидностью торцевых электрических машин в низкоскоростных безредукторных электроприводах.

Торцевые электрические машины могут быть двух типов: с дисковым ротором, несущим постоянные магниты [4] (т.е. с вращающимся безобмоточным индуктором), и индукторного типа с дисковым ротором в виде ферромагнитных полюсов. В свою очередь, двигатели индукторного типа могут быть как с электромагнитным возбуждением при наличии только одной общей обмотки возбуждения (ОВ) вне зависимости от числа полюсов $2P = n_{\tau}/2$ (n_{τ} — число полюсных делений торцевого сердечника якоря) [5], так и с комбинированным возбуждением [6].

В Одесском национальном политехническом университете на протяжении ряда лет ведутся разработки и исследования специальных ДПТБР второго типа, т.е. с безобмоточным ферромагнитным дисковым ротором [5].

Конструктивная схема такого ДПТБР представлена на рис. 1.

Двигатель постоянного тока с безобмоточным ротором содержит статор, состоящий из модулей якоря 1, 2, и ротор 3. На внутренней поверхности модулей якоря 1, 2 расположены тороидальные катушки обмотки возбуждения 4, 5. Модули якоря 1, 2 конструктивно однотипны и содержат ферромагнитные стержни-зубцы 6, 7, связанные поперечными ферромагнитными стержнями 8. Стержни-зубцы 6, 7 образуют зубцовые зоны, в промежутках (пазах) которых уложены проводники обмотки якоря 9, 10. Торцевые щиты статора представляют собой немаг-

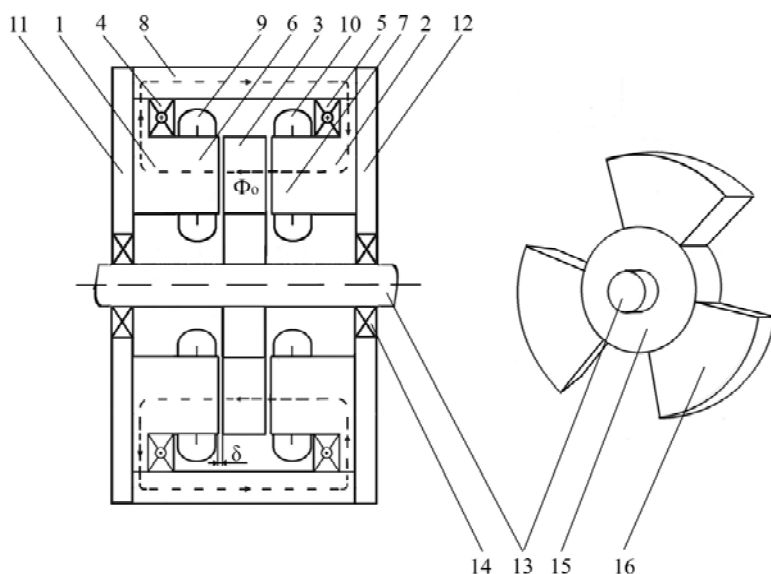


Рис. 1. Конструктивная схема ДПТБР

нитные диски 11, 12, установленные неподвижно относительно вала 13 посредством подшипников 14. С валом жестко сочленен дисковый ротор, состоящий из немагнитного диска 15 и ферромагнитных полюсов 16. Замкнутую магнитную цепь двигателя совместно образуют стержни-зубцы 6, 7, поперечные стержни 8 и полюса 16, отделенные от стержней-зубцов рабочим воздушным зазором δ . Используя ДПТБР в качестве низкоскоростного двигателя безредукторного привода, следует уделить особое внимание вопросу повышения КПД данного двигателя.

Рассмотрим основные положения возможного существенного повышения коэффициента полезного действия (КПД) низкоскоростного электродвигателя. Оставив на потери холостого хода P_0 (потери на возбуждение, трение, вентиляцию) 7 % подведенной мощности, рассмотрим частичный КПД $\eta_a = \frac{P_2}{(P_2 + P_m)}$, где P_2 — полезная мощность, а P_m — потери в меди, считая общий КПД низкоскоростного двигателя $\eta = \eta_a - 0,07$ [1]. Потери в меди двигателя постоянного тока с безобмоточным дисковым ротором (ДПТБР)

$$P_m = I_a^2 R_a = 2a i_a^2 R_{np} N / 2a = i_a^2 R_{np} N, \quad (1)$$

где I_a — ток якоря;

R_a — сопротивление якоря;

i_a — ток параллельной ветви;

N — общее число проводников обмотки якоря (ОЯ);

$$R_{np} = \rho_r \frac{l_\delta + l_{л.ч}}{S_{np}} = \frac{l_{п}}{S_{np}};$$

$\rho_r = 0,02 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$ — удельное сопротивление меди при обычных температурах нагрева;

l_δ — активная длина проводника;

$l_{л.ч}$ — длина лобовой части;

S_{np} — сечение проводника.

Длина проводника $l_{п} = l_\delta + 1,3\tau_{cp}$ при рекомендованных значениях

$$\lambda = \frac{l_\delta}{\tau_{cp}} = 1 \quad [3], \quad l_\delta = \tau_{cp},$$

где τ_{cp} — величина полюсного деления кольцевого сердечника якоря.

Тогда

$$l_{п} = l_\delta + 1,3l_\delta = 2,3l_\delta,$$

где $l_{л.ч} = 1,3l_\delta$

Для оценочного расчета можно принять

$$R_{\text{пр}} = \rho_r K_{\text{л.ч}} \frac{l_{\delta}}{S_{\text{пр}}}, \quad (2)$$

где $K_{\text{л.ч}} = \frac{l_{\delta} + l_{\text{л.ч}}}{l_{\delta}} = \frac{l_{\delta} + 1,3l_{\delta}}{l_{\delta}} = 2,3$ — коэффициент лобовых частей.

Для ДПТДР индукторного типа основное уравнение электрического равновесия $U = E_a + I_{\text{я}} R_{\text{я}}$ можно представить в виде

$$U = 0,5\alpha_{\delta} B_{\delta} l_{\delta} V \frac{N}{2a} + i_a R_{\text{пр}} \frac{N}{2a}, \quad (3)$$

где V — окружная скорость ротора.

Учитывая, что при расчете учитываются только потери в меди, принимаем

$$E_a = \eta_a U \text{ и } I_{\text{я}} R_{\text{я}} = (1 - \eta_a) U.$$

Тогда

$$\frac{IR}{E} = \frac{i_a R_{\text{пр}} \frac{N}{2a}}{0,5\alpha_{\delta} B_{\delta} l_{\delta} V \frac{N}{2a}} = \frac{1 - \eta_a}{\eta_a}. \quad (4)$$

Если учесть, что ток параллельной ветви $i_a = \Delta_a S_{\text{пр}}$, где Δ_a — плотность тока проводника А/мм^2 , окончательно получаем

$$\eta_a = \frac{0,5\alpha_{\delta} B_{\delta} V}{\Delta_a \rho_r K_{\text{л.ч}} + 0,5\alpha_{\delta} B_{\delta} V}. \quad (5)$$

Выражение (5) удобно представить в виде

$$\Delta_a = \left(\frac{1 - \eta_a}{\eta_a} \right) \frac{0,5\alpha_{\delta} B_{\delta} V}{\rho_r K_{\text{л.ч}}} \quad (6)$$

или, учитывая возможность варьирования как плотностью тока Δ_a , так и значением величины магнитной индукции в рабочем воздушном зазоре B_{δ} ,

$$\frac{\Delta_a}{B_{\delta}} = \frac{1 - \eta_a}{\eta_a} \frac{0,5\alpha_a V}{\rho_r K_{\text{л.ч}}}. \quad (7)$$

Для меди $\rho_r = 0,02 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$, $\alpha_{\delta} = 0,8$ — коэффициент полюсного перекрытия, $K_{\text{л.ч}} = 2,3$. Тогда получаем простое соотношение для дальнейшего анализа

$$\frac{\Delta_a}{B_{\delta}} = 8,7V \frac{1 - \eta_a}{\eta_a}. \quad (8)$$

Представим (7) в виде

$$\frac{A\Delta_a}{AB_{\delta}} = V \frac{1 - \eta_a}{\eta_a} \frac{0,5\alpha_a}{\rho_r K_{\text{л.ч}}}. \quad (9)$$

Откуда

$$A\Delta_a = K_{\text{фн}} V \frac{1 - \eta_a}{\eta_a} F', \quad (10)$$

где $A\Delta_a \left(\frac{\text{А}}{\text{м}} \frac{\text{А}}{\text{мм}^2} \right)$ — фактор нагрева электрической машины;

$F' = \alpha_{\delta} B_{\delta} A$ (Н/м^2) — удельное усилие якоря ДПТБР;

$K_{\text{фн}} = \frac{0,5}{\rho_r \cdot K_{\text{л.ч}}}$ — коэффициент фактора нагрева.

Таким образом, при одинаковых удельных усилиях на поверхности кольцевого сердечника, одинаковом отношении активной части витка к его полной длине, одном и том же материале обмотки и равном нагреве для сохранения одного и того же значения КПД меньшим значениям линейной скорости на поверхности якоря должны соответствовать во столько же раз меньшие значения фактора нагрева. Далее в табличной (табл. 1) и графической форме (рис. 2) представлены рекомендуемые значения фактора нагрева $A\Delta_a$ и плотности тока Δ_a в зависимости от скорости вращения для поддержания КПД в диапазоне от 80 % и выше при индукции в зазоре $B_\delta=0,8$ Тл, величине удельного усилия якоря ДПТБР $F^1=3 \cdot 10^4$ Н/м², максимальном значении плотности тока $\Delta_a = 6,5$ А/мм².

Таблица 1

Показатели фактора нагрева, плотности тока и КПД

Величина	P, кВт	n, об/мин								
		40	80	120	160	200	500	750	1000	1500
$A\Delta_a$, А/см·А/мм ²	20	540	720	990	1080	1260	1935	2520	2925	2925
	40	765	1035	1350	1485	1710	2430	2925	2925	2925
	75	945	1395	1755	2115	2340	2925	2925	2925	2925
	100	1080	1575	2025	2295	2565	2925	2925	2925	2925
Δ_a , А/мм ²	20	1,2	1,6	2,2	2,4	2,8	4,3	5,6	6,5	6,5
	40	1,7	2,3	3	3,3	3,8	5,4	6,5	6,5	6,5
	75	2,1	3,1	3,9	4,7	5,2	6,5	6,5	6,5	6,5
	100	2,4	3,5	4,5	5,1	5,7	6,5	6,5	6,5	6,5
КПД	20	0,8	0,81	0,81	0,82	0,83	0,84	0,84	0,84	0,86
	40	0,81	0,83	0,84	0,85	0,85	0,86	0,87	0,87	0,86
	75	0,83	0,85	0,85	0,86	0,86	0,88	0,88	0,9	0,89
	100	0,84	0,85	0,86	0,86	0,87	0,89	0,89	0,89	0,9

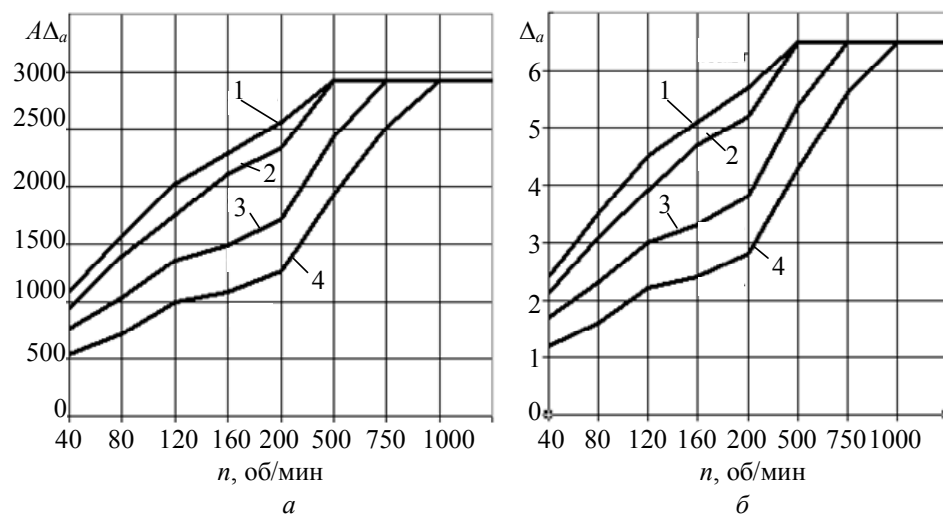


Рис. 2. Зависимость фактора нагрева (а) и плотности тока (б) от скорости: 100 (1); 75 (2); 40 (3); 20 (4) кВт

Известно, что у низкоскоростных машин классического типа с цилиндрическим якорем для сохранения высокого КПД нужно увеличивать массу обмотки и соответственно главные размеры МПТ (выбирая проводники большего сечения $S_{пр}$ при, например, меньшей плотности тока Δ_a). Однако, при использовании ДПТБР, которые являются разновидностью торцевых

машин, указанное увеличение массы обмотки, соответственно высоты паза магнитопровода якоря сказывается не столь значительно, т.к. торцевые машины имеют большое отношение диаметра к длине, т.е. осевому размеру. Следовательно, увеличение массы обмотки якоря не приводит к существенному увеличению основного размера торцевой машины — ее диаметра.

Представлено сравнение классических низкоскорстных двигателей постоянного тока и низкоскорстных ДПТБР (табл. 2).

Таблица 2

Сравнение классических низкоскорстных двигателей постоянного тока и низкоскорстных ДПТБР

Модель	P , кВт	U , В	n , об/мин	η , %	Δ_a , А/мм ²	m , кг	J , кг·м ²	M , Н·м
1GH5 635 (Siemens)	344	420	81	80		11250	289	40400
ДПТБР	344	420	81	87	3,3	9393	161	41838
DM1 400Z (ABB)	133	400	87	65		4950	73	14621
ДПТБР	133	400	87	86	3,2	4656	51	15188

С другой стороны уменьшение Δ_a приводит к уменьшению значения r_r и меньшему фактическому нагреванию обмотки, что существенно повышает ее надежность и долговечность. Известно, что в машинах постоянного тока доля отказов, возникающих в обмотке якоря, составляет около 80 % , в коллекторе около 11 % и в остальных элементах только примерно 9 % [7]. При снижении температуры нагрева, например, на 20..30 °С (что вполне реально даже при снижении плотности тока только вдвое) можно получить в 6..8 раз меньшую интенсивность отказов в обмотках, т.е. общая продолжительность безотказной работы машины постоянного тока увеличивается.

Таким образом, при понижении плотности тока существенно улучшается не только КПД ДПТБР, но и его долговечность, что позволяет создать надежный низкоскорстной безредукторный электропривод, работающий без остановок на ремонт в течение всего срока своей эксплуатации.

Литература

1. Свечарник, Д.В. Электрические машины непосредственного привода. Безредукторный электропривод / Д.В. Свечарник — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 208 с.
2. Брош, П.Ф. Второе рождение приводов постоянного тока / П.Ф. Брош // Конструктор-машиностроитель. — 2009. — № 1. — С. 24 — 26.
3. Гурин, Я.С. Проектирование машин постоянного тока / Я.С. Гурин, М.Н. Курочкин. — М.; Л.: Госэнергоиздат, 1961. — 350 с.
4. Белый, П.Н. Вопросы проектирования высокомоментных многослойных магнитоэлектрических двигателей дискового типа / П.Н. Белый // Вісн. східноукр. нац. ун-ту. — Луганськ, 2002. — № 4 (50). — С. 201 — 207.
5. Патент 2286642 Российская федерация. Электрический двигатель постоянного тока индукторного типа / В.В. Булгар, В.В. Гололобов, А.Д. Ивлев, А.В. Яковлев, Д.А. Ивлев // Бюл. — 2006 — № 30.
6. Патент 89072 Україна. Торцевий електричний двигун постійного струму з комбінованим збудженням / В.В. Булгар, А.Д. Івлєв, О.В. Яковлєв, Д.А. Івлєв // Бюл. — 2009. — № 24.
7. Свечарник, Д.В. Надежность и эффективность действия сложных автоматических систем / Д.В. Свечарник. — М.: Знание, 1971. — 210 с.

Рецензент д-р наук, проф. Одес. нац. политехн. ун-та Андрущенко О.А.

Поступила в редакцию 7 июня 2010 г.