

## ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ВЫСОКОКОЭРЦИТИВНЫМИ МАГНИТАМИ

Лютаревич А.Г.<sup>1</sup>, Долингер С.Ю.<sup>1</sup>, Чепурко Н.Ю.<sup>1</sup>, Хачевский К.В.<sup>1</sup>, Лохман Е.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВПО «Омский государственный технический университет», Омск, Россия (644050, г. Омск, пр. Мира, 11), e-mail: l.alexander@inbox.ru.

<sup>2</sup>ООО «Институт Микроприбор», Омск, Россия (644046, г. Омск-46, пр. К-Маркса, 41, корп. 100), e-mail: evg\_lohman@mail.ru.

---

В статье рассмотрена разработанная методика расчета электродвигателя постоянного тока с высококоэрцитивными магнитами, позволяющая по исходным данным (номинальному и максимальному вращающим моментам, частоте вращения, напряжению питания и коэффициенту полезного действия) получать основные параметры электрической машины, что упрощает этап проектирования электродвигателей. На основании разработанной методики произведен расчет основных параметров электродвигателя на постоянных магнитах. Далее был изготовлен комплект технологической оснастки и впоследствии корпусные детали двигателя. Произведена сборка электродвигателя с постоянными магнитами. Также проведены испытания электродвигателя. Результаты исследований показывают, что разработанный электродвигатель постоянного тока с высококоэрцитивными магнитами по основным техническим параметрам, определяющим его качественные характеристики, не уступает существующим аналогам. Данные исследования проведены при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России, а также Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере.

Ключевые слова: электрический двигатель с постоянными магнитами.

## BUSINESS DESIGN DC MOTOR WITH HIGH ENERGY MAGNETS

Lyutarevich A.G.<sup>1</sup>, Dolinger S.Y.<sup>1</sup>, Chepurko N.Y.<sup>1</sup>, Khatsevskiy K.V.<sup>1</sup>, Lohman E.A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Omsk state technical university, Omsk, Russia (644050, Omsk, pr. Mira, 11), e-mail: l.alexander@inbox.ru

<sup>2</sup>Ltd «Institut Micropribor», Omsk, Russia (644050, Omsk, pr. K. Marksa, 41/100), e-mail: evg\_lohman@mail.ru

---

The article is devoted to the design procedure of the DC motor with high energy magnets, allowing the initial data (nominal and maximum torque, speed, voltage, power factor and efficiency) to receive the main parameters of the electric machine, which simplifies the design phase motors. On the basis of the developed method calculated the basic parameters of the electric motor with permanent magnets. Next set was manufactured tooling and later body parts of the motor. Assemble the motor with permanent magnets. Also tested the motor. The results show that the developed DC motor with high energy magnets on the main technical parameters determining its qualitative characteristics, is not inferior to the existing peers. These studies were conducted with the financial support of the state in the face of the Ministry of education and science of Russia and the Foundation for Assistance to Small Innovative Enterprises in the scientific and technical field.

Keywords: electric motor with permanent magnets.

В последнее время проектированием электродвигателей с постоянными магнитами занимаются ведущие зарубежные электромашиностроительные компании («Сименс», «Бош Рексрот», «Дженерал Электрик», «Ансальдо», «Фанук» и др.). Кроме того, в большинстве каталогов готовой продукции этих компаний вентильные двигатели с постоянными магнитами представлены на первом месте.

В России в 80-х годах прошлого столетия были разработаны и освоены электроприводы с высококоэрцитивными магнитами, и если электромагнитная часть актуальна по настоящее время, то системы с аналоговым управлением и системы малоинтегрированные цифровые на

сегодняшний день не пригодны из-за больших габаритов и веса и не обеспечивают возросшие требования современного рынка.

Таким образом, вопросы проектирования двигателей с высококоэрцитивными магнитами являются актуальными, несмотря на то что содержат большое количество сложных многосторонних задач, решение которых создаст возможность для более широкого применения электродвигателей данного типа в различных отраслях науки и техники.

Целью данной статьи является разработка методики расчета электродвигателя постоянного тока с высококоэрцитивными магнитами, позволяющей по исходным данным получать основные параметры электрической машины.

### Решение задачи

В общем случае исходными данными для расчета электродвигателя являются:

- номинальный вращающий момент, Н•м;
- максимальный вращающий момент, Н•м;
- частота вращения, об/мин;
- напряжение питания  $U_H$ , В;
- коэффициент полезного действия, %.

В некоторых работах [4; 6–9] предъявляются дополнительные требования при проектировании электродвигателей: режим работы, условия работы, способ охлаждения, форма механической и регулировочной характеристики двигателя и другие условия.

Проектирование электрического двигателя с постоянными магнитами разделяется на два этапа [6–8]:

- 1) определение основных размеров;
- 2) проверочный электромагнитный расчет.

К основным размерам электродвигателя относят диаметр якоря  $D$ , его длину  $l$  и величину воздушного зазора  $\delta$ . По величинам  $D$  и  $l$  определяем размеры и конструкцию всех элементов электродвигателя: полюса, внешний диаметр статора, размеры вала и др. Они определяют массу, технико-экономические, производственные и эксплуатационные характеристики, а также надежность двигателя. Для определения основных размеров пользуются известным выражением для машинной постоянной [7]

$$D^2 l_i n / P' = 6,1 \cdot 10^7 / (\alpha_i k_\phi k_o A B_\delta) = C_A,$$

или

$$D^2 l_i = 6,1 \cdot 10^7 P' / (\alpha_i k_\phi k_o A B_\delta n), \quad (1)$$

где  $C_A$  – машинная постоянная;  $D$  – диаметр якоря;  $l_i$  – расчетная длина якоря;  $P'$  – расчетная мощность;  $\alpha_i$  – расчетный коэффициент полюсного перекрытия;  $k_\phi$  – коэффициент формы кривой поля;  $k_o$  – обмоточный коэффициент;  $A$  – линейная нагрузка;  $B_\delta$  – индукция в воздушном зазоре;  $n$  – номинальная частота вращения ротора.

Расчетную мощность электродвигателя определяют по выражению

$$P' = k_e \cdot P_{\text{мех}} / \eta, \quad (2)$$

где  $P_{\text{мех}} = M_n \omega \cdot \omega$  – номинальная мощность на валу электродвигателя;  $k_e = E/U$  – коэффициент, учитывающий внутреннее падение напряжения в двигателе;  $E$  – внутренняя ЭДС якоря.

Расчетный коэффициент полюсного перекрытия  $\alpha_i = b_i/\tau$  является функцией конструктивного коэффициента полюсного перекрытия  $\alpha_p = b_p/\tau$  и отношения минимального воздушного зазора  $\delta$  к максимальному  $\delta_{\text{макс}}$ . Коэффициент формы поля  $k_\phi$  является функцией  $\alpha_p = b_p/\tau$  и отношения  $\delta_{\text{макс}}/\delta$ . При синусоидальной форме поля  $k_\phi = 1,11$ . Обмоточный коэффициент  $k_o = k_y k_p k_{\text{ск}}$  равняется произведению трех коэффициентов: укорочения  $k_y$ , распределения  $k_p$  и скоса  $k_{\text{ск}}$  [7].

Электромагнитные нагрузки – линейная нагрузка  $A$  и индукция в воздушном зазоре  $B_\delta$  – сильно влияют на размеры электрической машины. Как следует из уравнения (1), увеличение произведения  $AB_\delta$ , характеризующего электромагнитную мощность, приводит к уменьшению размеров якоря. Однако увеличение произведения  $AB_\delta$  ограничивается тем, что начиная с некоторого его значения ухудшаются характеристики электродвигателя, кроме того, это приводит к перегреву, а также к увеличению внешних массогабаритных показателей.

Подстановка в уравнение (1) выбранных значений  $\alpha_i$ ,  $k_\phi$ ,  $k_o$ ,  $A$ ,  $B_\delta$ , а также подсчитанной расчетной величины  $P'$  и заданной частоты вращения  $n$  не позволяет окончательно определить диаметр  $D$  и расчетную длину  $l_i$ . Для того чтобы однозначно определить величины  $D$  и  $l_i$ , необходимо наложить условие определенного значения отношения  $\lambda = l_i/D$ , тогда из выражения (1) получаем

$$D = \sqrt[3]{6,1 \cdot 10^7 P' / (\alpha_i k_\phi k_o A B_\delta n \lambda)}. \quad (3)$$

Выбор величины  $\lambda$  не является произвольным, задача сводится к определению такого значения, при котором электродвигатель имел бы наименьшие размеры, массу и стоимость.

Известное расчетное значение диаметра якоря  $D$  позволяет предварительно определить наружный диаметр двигателя  $D_n = k_{дн}D$ , где  $k_{дн}$  – коэффициент, учитывающий соотношение между  $D_n$  и  $D$ , являющийся функцией числа пар полюсов.

При заданных значениях линейной нагрузки, мощности, частоты напряжения и числе пар полюсов удельный объем (на единицу мощности) постоянного магнита определяется выражением

$$\bar{V}_M = \frac{V_M}{P_H} = \frac{p \cdot k_e}{8k_\phi k_o f B_{\delta p} A}. \quad (4)$$

Для явнополюсных синхронных электродвигателей форма кривой поля зависит от формы постоянного магнита, очертания полюсного наконечника, длины полюсной дуги  $b_p$ . Для улучшения формы поля воздушный зазор делают неравномерным, изменяющимся по закону

$$\delta_x = \delta / \cos[\pi(x/\tau)]. \quad (5)$$

Соотношение  $\delta_{\max}/\delta = 1,5 \div 2,5$  позволяет получить форму поля, близкую к синусоидальной.

С применением ЭВМ проводится моделирование магнитных полей методом конечных элементов в программе ELCUT. Метод конечных элементов достаточно часто используется при моделировании электродвигателей с постоянными магнитами [1–3; 5]. По результатам расчета проводится уточнение размеров электрической машины, проверяется форма поля и рабочая индукция в зазоре.

Зная величины расчетной ЭДС  $E_\phi$ , частоты  $f$  и магнитного потока  $\Phi_\delta$ , определяем число витков в фазе обмотки

$$W_\phi = E_\phi / (4k_\phi k_o f \Phi_\delta) = k_e U_H / (k_\phi k_o f \Phi_\delta), \quad (6)$$

где  $\Phi_\delta = \alpha_i \tau l_i B_\delta$  – расчетная величина потока.

Для дальнейшего расчета обмотки якоря необходимо задаться допустимой плотностью тока в обмотке якоря  $j$ , по величине номинального тока определяется требуемое сечение провода

$$S = I_n / j, \quad (7)$$

где  $I_n = P_n / (m U_\phi)$  – номинальный ток.

Плотность тока в обмотке якоря зависит от ряда параметров, и в общем случае плотность тока находится в пределах от 5 до 40 А/мм<sup>2</sup>. Проверяется возможность размещения обмотки в заданном объеме, при необходимости уточняются плотность тока, число витков, размеры электрической машины, а затем проводится моделирование магнитных полей.

Активное сопротивление обмотки в радиальных электрических машинах с пазовым и беспазовым статором определяется выражением

$$R_{\phi} = \rho_t L_{cp} W_{\phi}, \quad (8)$$

где  $\rho_t$  – удельное сопротивление при рабочей температуре;  $L_{cp}$  – средняя длина витка.

Потери в электрической машине с постоянными магнитами складываются из джоулевых потерь в обмотке статора, потерь в стали магнитопровода статора и механических потерь. Джоулевы потери определяются по выражению

$$P_m = m I_{\phi n}^2 R_{\phi}. \quad (9)$$

Кроме того, необходимо определить потери в стали ярма статора. В беспазовых электрических машинах потери в стали магнитопровода (ярма) записываются в виде [7]

$$P_j = k_{\Delta} P_{1/400} B_j^2 M_j (f / 400)^{1,5}, \quad (10)$$

где  $k_{\Delta}$  – коэффициент, учитывающий увеличение потерь в стали в результате технологической обработки;  $P_{1/400}$  – удельные потери в стали при индукции 1 Тл и частоте 400 Гц;  $M_j$  – масса ярма, кг.

Механические потери состоят из аэродинамических потерь и потерь в подшипниках. Аэродинамические потери на трение о воздух в низкоскоростных моментных двигателях малы, и ими можно пренебречь. Потери на трение в подшипниках определяются по формуле

$$P_{подш} = 0,0015 G_{\Pi} V_{ц} / d_{ц}, \quad (11)$$

где  $G_{\Pi}$  – нагрузка на подшипник;  $d_{ц}$  – диаметр окружности центров шариков;  $V_{ц}$  – окружная скорость центров шариков.

КПД электрической машины определяется по следующей расчетной формуле

$$\eta = 1 - \Delta P_{\Sigma} / P, \quad (12)$$

где  $P$  – полезная мощность на валу электродвигателя;  $\Delta P_{\Sigma}$  – сумма потерь в электрической машине.

При необходимости уточняются некоторые параметры и проводится повторный расчет электродвигателя.

В соответствии с проведенными расчетами по разработанной ранее методике необходимое количество витков провода в фазе должно быть не менее 1288, соответственно в трех фазах общее количество витков равно 3864. Из расчета минимально возможного сопротивления принято решение использовать двойной провод ПЭТВ-2 диаметром 0,16 мм. Расчетный зазор между ротором и статором для укладки обмотки должен быть не более 3 мм. Для выполнения требований по форме ЭДС в виде изменения напряжения по

синусоидальному закону используем трехфазную распределенную обмотку с укороченным шагом на  $2\pi/9$  при  $q=3$ . Обмотка беспазового статора не имеет скоса, его заменяет секторное распределение проводников с учетом обмоточного коэффициента, равного 0,8973, с числом витков в чередующихся секциях обмотки 23–35–45–35–23 на один полюс с учетом того, что  $2p=8$  (8 полюсов), данное количество и данное чередование будет повторяться на каждом полюсе фазы А, В, С.

Изготовление столь сложной обмотки требует определенной технологии и подготовительных работ по изготовлению оснастки. Машинные способы укладки для данной обмотки не приемлемы, т.к. отсутствует свободное место для лобовых частей секций, в связи с этим обмотка двигателя укладывается вручную, тип укладки обмотки - волновая двухслойная. Для реализации этой задачи был изготовлен комплект технологической оснастки из фторопласта (рис. 1).



Рис. 1. Комплект технологической оснастки.

На следующем этапе были изготовлены детали двигателя (рис. 2–3).



Рис. 2. Ротор двигателя в сборе.



Рис. 3. Статор двигателя в сборе.

Статор двигателя собран из колец тонкого листового материала 49К2ФАВИ с термической обработкой в вакууме и заформован в основание статора на полимерный компаунд. Отформованная обмотка клеивается внутрь статора.

Для удобства проведения испытаний электрический двигатель собран в технологическом корпусе (рис. 4).



Рис. 4. Электродвигатель в сборе.

Произведено измерение ЭДС двигателя в генераторном режиме при вращении вала внешним электродвигателем. Результаты измерений ЭДС электродвигателя представлены на рисунке 5. Полученные зависимости указывают на корректную работу электродвигателя.

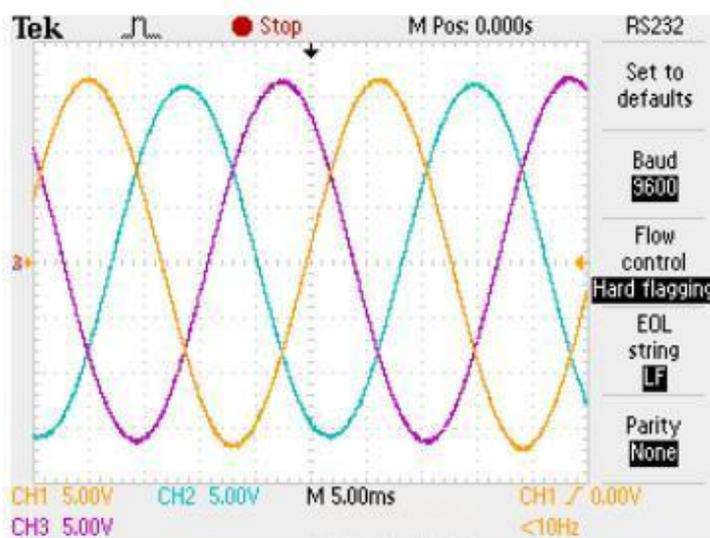


Рис. 5. Линейные ЭДС электродвигателя.

### Заключение

В ходе выполнения работы были получены следующие результаты:

➤ разработана методика расчета электродвигателя постоянного тока с высококоэрцитивными магнитами, позволяющая по исходным данным (номинальному и максимальному вращающим моментам, частоте вращения, напряжению питания и коэффициенту полезного действия) получать основные параметры электрической машины, что упрощает этап проектирования электродвигателей. На основании полученного расчета проведено изготовление и сборка электродвигателя с постоянными магнитами.

Результаты исследований показывают, что разработанный электродвигатель постоянного тока с высококоэрцитивными магнитами по основным техническим параметрам,

определяющим его качественные характеристики, не уступает существующим российским и иностранным аналогам.

### Список литературы

1. Горюнов В.Н. Выбор рационального направления намагниченности постоянных магнитов-модулей и составных магнитов в устройствах электромеханики / В.Н. Горюнов и др. // Электротехника. – 1993. – № 1. – С. 65–70.
2. Горюнов В.Н. Конечноэлементные модели линейных двигателей с постоянными магнитами / В.Н. Горюнов, В.Э. Тиль, Л.Е. Серкова // Электротехника. – 1994. – № 2. – С. 11–16.
3. Горюнов В.Н. Расчет трехмерных полей в электрических машинах с высококоэрцитивными магнитами / В.Н. Горюнов, В.З. Ковалев, Д.Г. Ходько // Электричество. – 1991. – № 5. – С. 15–19.
4. Леведев Н.И. Бесконтактные двигатели постоянного тока / Н.И. Леведев, И.Е. Овчинников. – Л. : Наука, 1979. – 270 с.
5. Лютаревич А.Г. Методика расчета электродвигателя постоянного тока с высококоэрцитивными магнитами / А.Г. Лютаревич, А.В. Грузд, Е.А. Лохман // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2013. – № 1. – С. 280-284.
6. Хрущев В.В. Трехфазные индукторные электрические машины с электромагнитной редукцией частоты вращения : учеб. пособие. – СПб. : СПбГУАП, 2005. – 76 с.
7. Хрущев В.В. Электрические машины систем автоматики. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 384 с.
8. Хрущев В.В. Электрические микромашины автоматических устройств : учеб. пособие для вузов. – Л. : Энергия, 1976. – 384 с.
9. MiladNiaz Azari, MojtabaMirsalim Performance Analysis of a Line-start Permanent Magnet Motor with Slots on Solid Rotor Using Finite-element Method // Electric Power Components and Systems. – 2012. - № 41. - P. 1159-1172.

### Рецензенты:

Харламов В.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Электрические машины и общая электротехника» ФГБОУ ВПО «Омский государственный университет путей сообщения», г.Омск;

Кандаев В.А., д.т.н., профессор кафедры «Инфокоммуникационные системы и информационная безопасность» ФГБОУ ВПО «Омский государственный университет путей

сообщения», г. Омск.