

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МАГНИТОДВИЖУЩИХ СИЛ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ ОБРАЩЕННОЙ КОНСТРУКЦИИ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ И ОБМОТКАМИ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Ковалев К.Л. \*, Тулинова Е.Е. \*\*, Иванов Н.С. \*\*\*

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

*\* e-mail: kaf310@mai.ru*

*\*\* e-mail: ketyl@mail.ru*

*\*\*\* e-mail: n.s.ivanov88@gmail.com*

---

Представлены расчетные аналитические выражения для основных параметров (электродвижущей силы (ЭДС) холостого хода, главного индуктивного сопротивления) синхронной электрической машины обращенной конструкции. Получено соотношение, устанавливающее связь магнитодвижущей силы (МДС) машины с электромагнитным возбуждением и возбуждением от постоянных магнитов. Данное соотношение позволяет определить рациональные параметры, при которых мощность электрической машины с обмотками возбуждения становится выше мощности машины с постоянными магнитами. Приведены зависимости мощности двух типов машин от частоты вращения и числа пар полюсов. Показано, что при величине тока возбуждения, близкой к 100 А, характерной для современных сверхпроводящих материалов уже при азотной температуре, мощность машины с электромагнитным возбуждением становится выше мощности машины с постоянными магнитами при одинаковых режимах охлаждения.

*Ключевые слова:* синхронная электрическая машина, аналитический расчет МДС, обмотка возбуждения.

---

### Введение

В [1] рассмотрены многополюсные синхронные генераторы обращенной конструкции с возбуждением от постоянных магнитов (ПМ). Несмотря на простоту конструкции, высокий коэффициент полезного действия (КПД) и надежность, эти генераторы имеют существенный недостаток — сложность регулирования, а также ограниченный температурный режим работы, так как большинство ПМ из редкоземельных металлов (РЗМ) теряют свои свойства при температуре выше 250 °С. Кроме того, максимальная мощность возбуждения таких машин ограничена характеристиками ПМ, из которых выполнен индуктор.

Рассмотрены синхронные машины (СМ) обращенной конструкции с электромагнитным возбуждением с обмотками как традиционной конструкции, так и на основе высокотемпературных сверхпроводниковых (ВТСП) лент. Наличие обмотки возбуждения позволяет осуществлять глубокое регулирование, а токонесущие способности современных ВТСП лент 2-го поколения позволяют создать

МДС обмотки возбуждения, превосходящую ПМ [2].

Синхронные электромеханические преобразователи (ЭМП) обращенной конструкции с электромагнитным возбуждением имеют перспективные области применения в ветроэнергетике, малой и средней гидроэнергетике, специальной и военной технике. Несмотря на важность, вопросы расчета и проектирования синхронной электрической машины (СЭМ) обращенной конструкции с электромагнитным возбуждением в литературе рассмотрены недостаточно полно. Менее всего освещен вопрос расчета и проектирования сверхпроводниковых синхронных машин указанного типа.

Кроме того, вопрос выбора того или иного типа возбуждения чаще всего решается исходя из опыта проектирования разработчика; в ряде случаев это приводит к нерациональному выбору. Получены аналитические соотношения, позволяющие определить значение МДС возбуждения на основании геометрических размеров активной зоны, параметров постоянных магнитов, плотности тока обмотки воз-

буждения (ОВ). Это дает возможность более рационально подойти к вопросу выбора системы возбуждения и ее параметров, а также сократить время на принятие решения о выборе типа возбуждения индуктора на предварительных этапах расчета и проектирования электрических машин обратной конструкции.

**Аналитический расчет распределения двумерных магнитных полей в активной зоне СЭМ**

Конструктивная схема неявнополюсной многополюсной синхронной машины обратной конструкции с электромагнитным возбуждением представлена на рис. 1,а. Данная схема позволяет использовать в обмотке возбуждения и якоря катушки типа рейстрек из современной ВТСП ленты. При этом создание с помощью ВТСП лент традиционных барабанных обмоток на сегодняшний день невозможно в силу механических свойств сверхпроводников.

Расчетная схема СЭМ дана на рис. 1,б.

При постановке задачи расчета двумерных магнитных полей принимаются следующие основные допущения:

- сердечник статора считается ненасыщенным,  $\mu_c \rightarrow \infty$ ;
- сердечник ротора машины считается ненасыщенным,  $\mu_u \rightarrow \infty$ ;
- используется приближение активной зоны обмотки статора эквивалентным токовым слоем, расположенным на радиусе  $R_a$  с линейной плотностью тока  $J_0$ , синусоидально распределенной по угловой координате  $\varphi$ ;
- машина считается достаточно длинной,  $\tau/L_s \ll 1$  (здесь  $\tau$  — полюсное деление;  $L_s$  — активная длина СМ);

— обмотка возбуждения заменяется кольцевой зоной с равномерно распределенной знакопеременной плотностью тока.

В расчетах принимается, что обмотка возбуждения расположена на вращающемся роторе и имеет вид кольцевого цилиндра, разделенного по окружности на участки с разными направлениями токов по числу пар полюсов, с равномерно распределенной плотностью тока. Учет воздушных промежутков между обмотками полюсов можно произвести введением соответствующей ступенчатой функции распределения плотности тока в обмотке возбуждения [3].

В установившемся режиме в синхронной электрической машине магнитные поля описываются уравнениями магнитостатики вида [4]

$$\text{div} B = 0; \text{rot} H = J \tag{1}$$

с граничными условиями на поверхности раздела сред с различными магнитными проницаемостями:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial A_i}{\partial \varphi} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial A_j}{\partial \varphi}; \tag{2}$$

$$-\frac{1}{\mu_0 \mu_i} \frac{\partial A_i}{\partial \rho} = -\frac{1}{\mu_0 \mu_j} \frac{\partial A_j}{\partial \rho}, \tag{3}$$

где  $A$  — векторный магнитный потенциал,  $B = \text{rot}(A)$ ;  $i, j$  — индексы векторного магнитного потенциала по разные стороны границы раздела сред.

Соотношения (1) для стационарных двумерных магнитных полей сводятся к уравнению Пуассона относительно векторного магнитного потенциала  $A$  [5]:

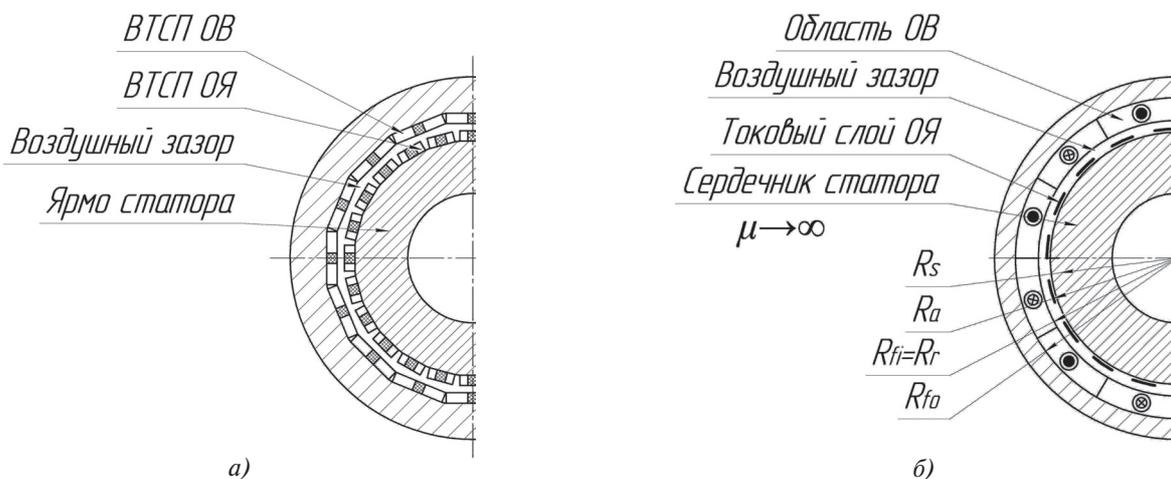


Рис. 1. Синхронная машина обратной конструкции с электромагнитным возбуждением: а — конструктивная схема; б — расчетная схема

$$\Delta A = \mu_0 J \Pi + \mu_0 J_0 \sin(p\phi) \delta(\rho - R_a), \quad (4)$$

где  $J$  — плотность тока в обмотке возбуждения;  $\mu_0$  — магнитная проницаемость вакуума;  $\delta(\rho - R_a)$  — дельта-функция;  $\Pi$  — ступенчатая функция, учитывающая влияние воздушных промежутков между обмотками полюсов возбуждения;  $J_0 = m i_m W_a K_a / (\pi R_a)$  — линейная плотность тока;  $W_a$  — число витков фазы обмотки якоря (ОЯ);  $i_m$  — амплитудное значение тока статора;  $K_a$  — обмоточный коэффициент.

Для векторного магнитного потенциала  $A$  в силу принципа суперпозиции распределение магнитных полей в активной зоне машины может быть представлено как

$$A = A_s + A_r, \quad (5)$$

где  $A_s$  — решение от токового слоя статора;  $A_r$  — решение от токов ротора; при этом  $A_s$  и  $A_r$  удовлетворяют граничным условиям (2) и (3).

Таким образом, при расчете магнитного поля в активной зоне СЭМ можно выделить следующие области, различающиеся электрическими и магнитными свойствами (используется полярная система координат):

- 1)  $0 \leq \rho \leq R_s$  — сердечник статора генератора ( $\mu \rightarrow \infty$ );
- 2)  $R_s \leq \rho \leq R_{fi}$  — область воздушного зазора ( $\mu = 1$ );
- 3)  $R_{fi} \leq \rho \leq R_{f0}$  — область, занятая обмоткой индуктора ( $\mu = 1$ );
- 4)  $R_{f0} \leq \rho$  — внешняя область (ярмо) ротора ( $\mu \rightarrow \infty$ ).

При необходимости поправка на параметры СЭМ за счет конечного размера зубцовой зоны, магнитопровода статора и ротора может быть найдена по теории магнитных цепей [6].

Учитывая свойства сред и граничные условия (2) и (3), запишем уравнение (5) в следующем виде:

$$A = \begin{cases} A_{yf}(\rho, \phi) + A_f(\rho, \phi + \gamma) & \text{при } R_s < \rho < R_r; \\ A_{s\delta}(\rho, \phi) + A_{\delta r}(\rho, \phi + \gamma) & \text{при } R_r < \rho < R_{f0}. \end{cases} \quad (6)$$

Здесь  $\gamma$  — угол поворота магнитных полюсов ротора относительно магнитных полюсов статора;

$A_{yf}, A_f, A_{s\delta}, A_{\delta r}$  — выражения для векторного магнитного потенциала в области ОВ от токов ОЯ и ОВ и в области воздушного зазора от токов ОЯ и ОВ соответственно, определяемые аналогично [1] из соотношений (2) и (3):

$$A_{yf} = (t_1 \sin(p\phi) + t_2 \cos(p\phi))\rho^p + (t_3 \sin(p\phi) + t_4 \cos(p\phi))\rho^{-p};$$

$$A_f = \frac{2\mu_0 w_f i_f k_f}{\pi(R_{f0}^2 - R_{fi}^2)} \frac{k_f}{p(p+2)} \left\{ \left[ \left( \frac{R_{f0}}{\rho} \right)^{-p+2} \frac{2+p}{2-p} - \left( \frac{R_{fi}}{\rho} \right)^{p+2} - \frac{2p}{2-p} \right] \rho^2 + \frac{\rho^p}{R_{f0}^{2p}} (R_{f0}^{p+2} - R_{fi}^{p+2}) \right\} \times \\ \times \sin(p\phi) + (e_1 \sin(p\phi) + e_2 \cos(p\phi))\rho^p + (e_3 \sin(p\phi) + e_4 \cos(p\phi))\rho^{-p};$$

$$A_{s\delta} = \frac{\mu_0 m i_m W_a K_a}{2p\pi} \left\{ \left[ \left( \frac{\rho}{R_s} \right)^{-p} + a_p \rho^p + a_p \frac{R_s^{2p}}{\rho^p} + \frac{R_s^p}{\rho^p} \right] \times \right. \\ \left. \times \sin(p\phi) + c_p \left( \rho^p + \frac{R_s^{2p}}{\rho^p} \right) \cos(p\phi) \right\};$$

$$A_{\delta r} = \frac{2\mu_0 w_f i_f k_f}{\pi(R_{f0}^2 - R_{fi}^2)} \frac{k_f}{p} \times \\ \times \left( \frac{R_{f0}^{-p+2} - R_{fi}^{-p+2}}{2-p} + \frac{1}{R_{f0}^{2p}} \frac{R_{f0}^{p+2} - R_{fi}^{p+2}}{2+p} \right) \rho^p \sin(p\phi) + \\ + (f_1 \sin(p\phi) + f_2 \cos(p\phi))\rho^p + (f_3 \sin(p\phi) + f_4 \cos(p\phi))\rho^{-p},$$

где  $w_f$  — полное число витков ОВ;  $k_f$  — обмоточный коэффициент ОВ;  $p$  — число пар полюсов;  $i_f$  — ток возбуждения;  $R_{fi}, R_{f0}, R_a, R_s$  — геометрические размеры активной зоны (рис. 1,а);

$$e_1 = \frac{GR_s^{2p} (R_1 R_{fi}^{2-p} \frac{2+p}{2-p} + R_{f0}^{2-p} R_2)}{(R_{f0}^{2p} - R_s^{2p})(2+p)};$$

$$e_3 = \frac{GR_s^{2p} (R_{f0}^{2p} R_1 R_{fi}^{2-p} \frac{2+p}{2-p} + R_{f0}^{p+2} R_2)}{(R_{f0}^{2p} - R_s^{2p})(2+p)};$$

$$t_1 = \frac{2D_f R_s^p}{R_{f0}^{2p} - R_s^{2p}};$$

$$t_3 = \frac{2D_f R_s^p R_{f0}^{2p}}{R_{f0}^{2p} - R_s^{2p}};$$

$$a_p = \frac{2R_s^p}{R_{f0}^{2p} - R_s^{2p}};$$

$$f_3 = \frac{GR_s^{2p} \left( R_{f0}^{2p} R_1 R_{fi}^{2-p} \frac{2+p}{2-p} + R_{f0}^{p+2} R_2 \right)}{(R_{f0}^{2p} - R_s^{2p})(2+p)};$$

$$D_f = \frac{\mu_0 K_a m i_m W_a}{2p\pi};$$

$$f_1 = \left\{ G(-R_{f0}^{2p} R(2+p) + R_s^{2p} R(2+p) + R_{f0}^{2p} R_1 R_{fi}^{2-p} \frac{2+p}{2-p} + R_{f0}^{p+2} R_2 \right\} / \left\{ (R_{f0}^{2p} - R_s^{2p})(2+p) \right\};$$

$$e_2 = e_4 = f_2 = f_4 = c_p = t_2 = t_4 = 0;$$

$$J_0 = \frac{m i_m W_a K_a}{\pi R_a} \text{ — линейная плотность тока; } i_m \text{ —}$$

амплитудное значение тока якоря;  $m$  — число фаз;  $W_a$  — число витков фазы якоря;  $K_a$  — обмоточный коэффициент ОЯ;

$$R = \frac{R_{f0}^{-p+2} - R_{fi}^{-p+2}}{2-p} + \frac{1}{R_{f0}^{2p}} \frac{R_{f0}^{p+2} - R_{fi}^{p+2}}{2+p};$$

$$R_1 = \frac{R_{f0}^{-p+2} - R_{fi}^{-p+2}}{R_{fi}^{-p+2}}; \quad R_2 = \frac{R_{f0}^{p+2} - R_{fi}^{p+2}}{R_{f0}^{p+2}};$$

$$G = \frac{2\mu_0 w_f i_f k_f}{\pi(R_{f0}^2 - R_{fi}^2) p}$$

— конструктивные коэффициенты.

Таким образом, соотношение (6) позволяет определить значение векторного магнитного потенциала в любой из заданных областей СЭМ (рис. 1,а), что дает возможность перейти к определению основных параметров машины.

### Основные параметры машины и сравнение МДС ОБ и ПМ

В силу неявнополюсности машины, главные индуктивные сопротивления по осям  $d$  и  $q$  будут равны  $X_{ad} = X_{aq} = X_a$  [7]. Основными параметрами машины для проведения оценочных расчетов являются ЭДС холостого хода  $E_0$  и главное индуктивное сопротивление  $X_a$ .

Главное индуктивное сопротивление может быть получено из величины энергии одной фазы ОЯ  $W_1$ , которая определяется как отношение полной энергии к числу фаз  $W_1 = W/m$ . При этом полная энергия [1]

$$W = 1/2 L_s R_s \int_0^{2\pi} J_0 \sin(p\phi) A_\delta \Big|_{\rho=R_s} d\phi,$$

где  $J_0 = m i_m W_a K_a / (\pi R_s)$  — токовая нагрузка статора;  $L_s$  — активная длина машины [1];  $A_\delta$  — векторный магнитный потенциал в воздушном зазоре при нулевом токе ОБ, полученный из (5) [1].

Используя соотношения:  $W_1 = LI_c^2/2$  — энергия одной фазы ( $L$  — индуктивность фазы);  $X_a = \omega L$  — индуктивное сопротивление фазы;  $I_c = i_m / \sqrt{2}$  — действующее значение тока статора [7], получим выражение для индуктивного сопротивления:

$$X_a = 4f \frac{L_s W_a^2 K_a^2 \mu_0 m}{p} \left( \frac{R_{f0}^{2p} + R_s^{2p}}{R_{f0}^{2p} - R_s^{2p}} \right). \quad (7)$$

Действующее значение ЭДС холостого хода  $E_0$  может быть найдено через поток от обмотки возбуждения при нулевых токах статора с помощью следующих соотношений [6, 7]:

$$E_0 = \pi \sqrt{2} K_a W_a f \Phi_m; \quad \Phi_m = 2/\pi \tau L_s B_m; \quad \tau = \pi R_s / p,$$

где  $\tau$  — полюсное деление;  $B_m = (\partial A_\delta / \rho \partial \phi) \Big|_{\rho=R_s}$  — амплитудное значение радиальной составляющей магнитной индукции в воздушном зазоре на радиусе якоря машины  $\rho = R_s$ .

Применяя полученные соотношения для векторного магнитного потенциала, можно получить значение для ЭДС холостого хода:

$$E_0 = 2\pi\sqrt{2}K_a W_a f L_s G R_s^p \times \frac{1}{2+p} \frac{2R_{f0}^{2p}}{R_{f0}^{2p} - R_s^{2p}} \left( \frac{2+p}{2-p} R_{fi}^{-p+2} R_1 + R_{f0}^{-p+2} R_2 \right). \quad (8)$$

Используя аналитические методики, полученные здесь и в работе [1], можно провести сопоставление основных параметров машин с возбуждением от ПМ и с электромагнитным возбуждением на основе ВТСП лент второго поколения, в частности установить непосредственную связь между МДС ОВ машины обращенной конструкции с электромагнитным возбуждением и МДС машины с ПМ.

Рассмотрим две машины с одинаковой геометрией активной зоны, равным числом пар полюсов, эквивалентными обмоточными параметрами статоров, одинаковым напряжением ОЯ и равной интенсивностью охлаждения якоря. При этом одна машина с ротором на основе ПМ, а вторая — с электромагнитным возбуждением на основе ВТСП лент второго поколения. Можно подобрать такое значение тока ОВ, чтобы максимальная мощность обеих машин была одинаковой, т.е.  $P_{2f} = P_{2m}$ , где  $P_{2f} = mUE_{0f}/X_{af}$  — мощность машины с электромагнитным возбуждением на основе ВТСП;  $P_{2m} = mUE_{0m}/X_{am}$  — мощность машины с возбуждением ПМ;  $m$  — число фаз;  $U$  — напряжение на ОЯ;  $E_0$  — ЭДС холостого хода;  $X_a$  — главное индуктивное сопротивление. Индекс  $f$  соответствует параметрам, полученным для машины с электромагнитным возбуждением,  $m$  — для магнитоэлектрической машины. Тогда можно записать:

$$E_{0f}/X_{af} = E_{0m}/X_{am}. \quad (9)$$

Подставляя (7), (8) и соотношения для ЭДС и индуктивного сопротивления, полученные в [1] для машины с возбуждением от ПМ, в (9), можно получить выражение для оценки минимального значения МДС ОВ  $F$  машины с электромагнитным возбуждением, которая необходима для достижения заявленного уровня мощности машины с ПМ:

$$F = \frac{M_0(R_0^{2p} - R_r^{2p})(2+p)\pi(R_0^2 - R_r^2)}{4\mu_0 K_f R_0^{2p} R_r \left( R_1 \frac{2+p}{2-p} + \left( \frac{R_0}{R_r} \right)^{-p+2} R_2 \right)}. \quad (10)$$

Здесь  $M_0$  — магнитный момент постоянных магнитов;  $R_0$  — внешний радиус постоянных магнитов;  $R_r$  — внутренний радиус обоймы с ПМ [1];  $p$  —

число пар полюсов;  $R_1, R_2$  — параметры, определяемые соответственно соотношениями:

$$R_1 = \frac{R_{f0}^{-p+2} - R_{fi}^{-p+2}}{R_{fi}^{-p+2}} \text{ и } R_2 = \frac{R_{f0}^{p+2} - R_{fi}^{p+2}}{R_{f0}^{p+2}};$$

$K_f$  — обмоточный коэффициент ОВ.

Таким образом, минимальное необходимое значение МДС ОВ может быть определено по известным геометрическим размерам индуктора машины и намагниченности  $M_0$  ПМ ротора.

Выражение (10) позволяет определить минимальную величину МДС, которую необходимо создать, чтобы выходная мощность СЭМ с электромагнитным возбуждением была равна мощности машины с постоянными магнитами в заданных габаритах. Используя (10), можно оценить целесообразность перехода к электромагнитному возбуждению и, в частности, к возбуждению на основе ВТСП лент при криогенном охлаждении.

Установив связь МДС возбуждения двух типов машин, можно получить зависимости, показывающие, при каких режимах работы каждая из них будет обладать наибольшей мощностью. Для этого были выбраны параметры машины, разработанной в МАИ на кафедре 310 (см. таблицу).

Параметры исследуемых машин

Параметр	Значение
Мощность, кВт	200
Номинальное напряжение, В	450
Намагниченность ПМ, Тл	1.4
Радиус расточки статора, мм	163
Воздушный зазор, мм	7
Высота ПМ, мм	44
Активная длина, мм	218
Число витков фазы якоря	48

Данная машина имеет ВТСП обмотку возбуждения и вращающийся криостат, разделяющий статор и ротор. В связи с этим машина имеет существенный воздушный зазор. Было выполнено сравнение выходной мощности машины в случае если ее ротор выполнен на основе ПМ и ОВ в генераторном режиме в зависимости от числа пар полюсов при различном токе возбуждения машины с электромагнитным возбуждением.

По заданным параметрам машины с использованием соотношения (10) была определена необходимая МДС ОВ машины с электромагнитным возбуждением, которая составила  $F = 67775$  А. Принималось, что число пар полюсов  $p = 1$ , частота вращения ротора постоянна,  $n = 1500$  мин<sup>-1</sup>. Достичь требуемого уровня МДС индуктора можно, приняв число витков обмотки индуктора  $W_f = 700$  при токе возбуждения  $i_f = 96$  А. Это значение тока возбуждения и числа витков ОВ использовалось при определении влияния числа пар полюсов на максимальную мощность машины в генераторном режиме. Исследование влияния числа пар полюсов на величину выходной мощности двух типов машин при различном уровне тока возбуждения (рис. 2) показало, что при частоте вращения ротора  $n = 1500$  мин<sup>-1</sup> мощность машины с электромагнитным возбуждением при малом числе пар полюсов может быть выше, чем для машины с возбуждением от ПМ, но с увеличением полюсности ее значение быстро падает и при  $p > 2$  оказывается ниже мощности машины с ПМ. Из-за резкого снижения ЭДС машины с электромагнитным возбуждением вследствие роста числа пар полюсов  $p$ . Это связано с тем, что сердечник катушки возбуждения ограничен снизу величиной минимального радиуса изгиба ВТСП ленты, из которой выполнены катушки. При большом числе пар полюсов его ширина относительно ширины катушки оказывается значительной, что ограничивает место для размещения катушки, вследствие чего снижается МДС возбуж-

дения. Для машины с возбуждением от ПМ наблюдается до определенного предела рост ЭДС при увеличении  $p$  [1]. Рост тока возбуждения выше расчетного значения позволяет при малой полюсности добиться увеличения мощности машины с ОВ и превзойти мощность машины с ПМ. Также видно, что при расчетном значении силы тока возбуждения мощность двух машин совпадает при  $p = 1$ .

**Выводы**

1. На основе аналитического решения задач о распределении магнитных полей в активной зоне электрической машины обращенной конструкции с электромагнитным возбуждением и возбуждением от ПМ получены выражения для ЭДС и индуктивных сопротивлений. Полученные выражения позволяют определить зависимость выходных параметров машин от числа пар полюсов, геометрических размеров активной зоны, МДС возбуждения. Также, в случае использования ВТСП лент в составе ОВ, возможно определить зависимость параметров машины от свойств применяемой ленты.

2. С использованием изложенных результатов и учетом проведенных ранее исследований [1] получено выражение для оценки минимального значения МДС ОВ машины обращенной конструкции с электромагнитным возбуждением. Это значение МДС необходимо для достижения уровня мощности машины с ПМ. Установлено, что мощность машины с электромагнитным возбуждением может быть выше при небольшой полюсности и токе ВТСП ленты, близком к 100 А. Этот показатель является достижимым для современных ВТСП лент при азотной температуре, что позволяет сделать вывод о целесообразности перехода от СЭМ с ПМ к синхронным электрическим машинам с ВТСП ОВ.

3. Полученные аналитические соотношения могут быть использованы в ходе оптимизационных расчетов для определения главных размеров активной зоны машины. Сочетание фундаментальных решений теоретических задач, приведенных в данной работе, и современные методы моделирования позволят разработать новые методики расчета электрических машин, как традиционных, так и на основе ВТСП материалов.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках государственного задания (проект № 8.7885.2017/БЧ).*

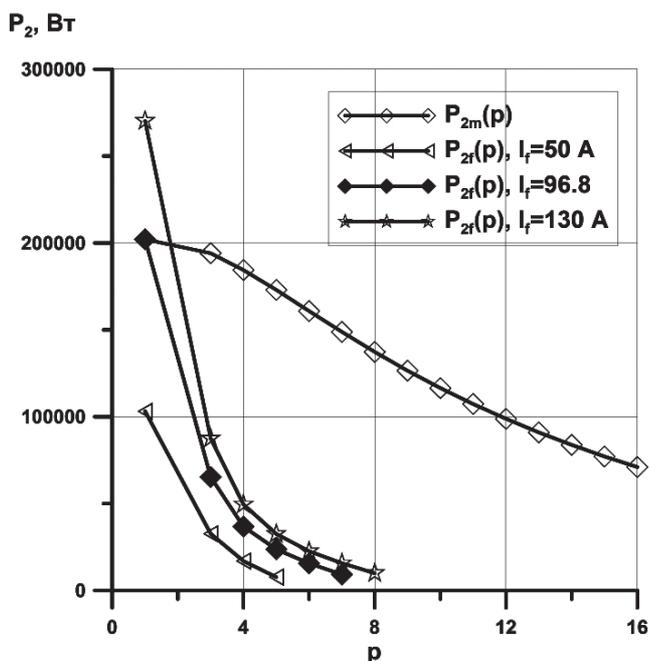


Рис. 2. Зависимость мощности машины для различных типов возбуждения от числа пар полюсов

## Библиографический список

1. Иванов Н.С., Тулинова Е.Е. Синхронные генераторы обращенной конструкции с постоянными магнитами для ветроэнергетических установок и малой энергетики // Труды МАИ. 2013. № 68. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=41950>
2. Журавлев С.В., Зечихин Б.С., Кузьмичев Р.В. Аналитический расчет магнитного поля в активной зоне синхронных машин с постоянными магнитами // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 1. С. 197-209.
3. Казовский Е.Я., Карцев В.П., Шахтарин В.Н. Сверхпроводящие магнитные системы. — Л.: Наука, 1967. — 323 с.
4. Иванов-Смоленский А.В. Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах. — М.: Высшая школа, 1989. — 312 с.
5. Ковалев Л.К., Ковалев К.Л., Конеев С.М.-А., Пенкин В.Т., Полтавец В.Н., Ильясов Р.И., Дежин Д.С. Электрические машины и устройства на основе массивных высокотемпературных сверхпроводников. — М.: Физматлит, 2010. — 396 с.
6. Балагуров В.А., Галтеев Ф.Ф., Ларионов А.Н. Электрические машины с постоянными магнитами. — М.: Энергия, 1964. — 480 с.
7. Вольдек А.И. Электрические машины. — М.: Энергия, 1966. — 782 с.

## COMPARATIVE ANALYSIS OF MAGNETOMOTIVE FORCES OF THE REVERCED STRUCTURE SYNCHRONOUS MOTOR WITH PERMANENT MAGNETS AND EXCITATION WINDINGS

Kovalev K.L.\* , Tulinova E.E.\*\* , Ivanov N.S.\*\*\*

Moscow Aviation Institute (National Research University),  
MAI, 4, Volokolamskoe shosse, Moscow, A-80, GSP-3, 125993, Russia

\* e-mail: [kaf310@mai.ru](mailto:kaf310@mai.ru)

\*\* e-mail: [ketyl@mail.ru](mailto:ketyl@mail.ru)

\*\*\* e-mail: [n.s.ivanov88@gmail.com](mailto:n.s.ivanov88@gmail.com)

### Abstract

The article considers synchronous motors of a reversed structure with electromagnetic excitation of both conventional and based on high temperature superconductor tapes (HTST). The presence of excitation winding allows perform deep regulation, while current carry capabilities of modern HTS tapes of second generation allow create magnetomotive force (MMF) of the excitation winding, exceeding permanent magnets.

Synchronous electromechanical transducers of reversed structure with electromagnetic excitation open prospective application domains in wind-power engineering, low and middle power hydropower, special and military applications.

Based on analytical solution of the problems of magnetic fields distribution in active zone of electric motor of a reversed structure with both electromagnetic and permanent magnet (PM) excitation, the authors obtained equations for electromotive force (EMF) and inductive resistance. The obtained equations allow determine the dependence of motor's output parameters on the pairs of poles number, geometry of active zone, and excitation MMF. Likewise, in case of HTS tapes' implementation in the excitation winding (EW), it is possible to define the dependence of the motor

parameters on the properties of the tape in use. Based on analytical equations the comparison of the motor of a reversed structure excitation MMF with PM excitation was performed. Besides, the analytical equation allowing compare these two types of excitation was obtained. It is shown, that the power of a motor with electromagnetic excitation can be greater with lower number of poles and HTS tape current close to 100 A. The obtained analytical equations can be employed for optimization calculations while defining the main sizes of a motor active zone. The combination of the presented fundamental solutions of theoretical problems and modern simulation methods will allow develop new calculation procedures for both traditional motors and motors based on HTS materials.

**Keywords:** synchronous electrical machines, analytical calculation of the magnetomotive force, field winding.

### References

1. Ivanov N.S., Tulinova E.E. *Trudy MAI*, 2013, no. 68, available at: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=41950>
2. Zhuravlev S.V., Zechikhin B.S., Kuz'michev R.V. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2016, vol. 23, no. 1, pp. 197-209.

3. Kazovskii E.Ya., Kartsev V.P., Shakhtarin V.N. *Sverkhprovodyashchie magnitnye sistemy* (Superconducting magnet systems), Leningrad, Nauka, 1967, 323 p.
4. Ivanov-Smolenskii A.V. *Elektromagnitnye sily i preobrazovanie energii v elektricheskikh mashinakh* (Electromagnetic forces and energy transformation in electrical motors), Moscow, Vysshaya shkola, 1989, 312 p.
5. Kovalev L.K., Kovalev K.L., Koneev S.M.-A., Penkin V.T., Poltavets V.N., Il'yasov R.I., Dezhin D.S. *Elektricheskie mashiny i ustroystva na osnove massivnykh vysokotemperaturnykh sverkhprovodnikov* (Electric motors and devices based on bulk high temperature superconductors), Moscow, Fizmatlit, 2010, 396 p.
6. Balagurov V.A., Galteev F.F., Larionov A.N. *Elektricheskie mashiny s postoyannymi magnitami* (Electric motors with permanent magnets), Moscow, Energiya, 1964, 480 p.
7. Vol'dek A.I. *Elektricheskie mashiny* (Electric motors), Moscow, Energiya, 1966, 782 p.