

Методика расчета распределения магнитного поля в активной зоне синхронных генераторов с электромагнитным возбуждением в автономных электроэнергетических установках

КОВАЛЕВ Л.К., КОВАЛЕВ К.Л., ИВАНОВ Н.С., ТУЛИНОВА Е.Е.

Представлена аналитическая методика расчета двухмерных магнитных полей в активной зоне неявнополюсного синхронного генератора с обмоткой возбуждения в индукторе на роторе. Получены аналитические зависимости для ЭДС и главного индуктивного сопротивления генератора. Обсуждаются перспективы использования обращенной конструкции синхронных машин в электроэнергетических установках. В сочетании с ранее разработанной аналитической методикой расчета синхронного генератора с постоянными магнитами, изложенной в [1], разработанный подход позволяет установить взаимосвязь магнитодвижущей силы (МДС) постоянного магнита (ПМ) и МДС обмотки возбуждения (ОВ), выполненной из меди или высокотемпературных сверхпроводников. Это позволяет оценить эффективность использования тех или иных типов машин (с ПМ или с электромагнитным возбуждением) и установить, при каких условиях охлаждения различные типы машин обладают наиболее высоким уровнем мощности единичного агрегата.

Ключевые слова: синхронный генератор, электромагнитное возбуждение, двухмерные магнитные поля, высокотемпературные сверхпроводниковые элементы, мощность единичного агрегата

На современном уровне развития авиационной и космической техники одним из важнейших показателей является мощность компактных бортовых источников питания. Машины с электромагнитным возбуждением из медных проводов обладают меньшими значениями МДС индуктора по сравнению с машинами с постоянными магнитами, однако дают возможность регулирования параметров машины. Разработанный в статье подход позволяет проводить детальные расчеты электрических машин со сложным ротором, в том числе с применением высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) второго поколения на роторе [2]. Применение новых ВТСП токонесущих элементов может существенно увеличить удельную мощность машины.

В литературе подробно исследовано проектирование синхронных машин как с электромагнитным возбуждением, так и с возбуждением от постоянных магнитов. Однако вопросы определения характеристик и проведения сравнительного анализа МДС машин обоих видов возбуждения рассмотрены недостаточно полно. Установив связь между МДС магнита и ВТСП обмотки возбуждения, представляется возможным оценить эффективность использования машин (с различным видом возбуждения), а также определить, при каких условиях охлаждения они обладают наиболее высоким уровнем мощности единичного агрегата.

Статья посвящена решению задачи о распределении двухмерных магнитных полей в активной зоне многополюсных генераторов с электромагнит-

ным возбуждением в индукторе. Получены аналитические выражения для основных параметров генераторов, позволяющие рассчитать внешние характеристики и провести частичную оптимизацию их параметров с учетом геометрии активной зоны, насыщения сердечника ротора.

Постановка задачи расчета двухмерных магнитных полей. Схема неявнополюсного многополюсного синхронного генератора (СГ) с обмоткой возбуждения (ОВ) представлена на рис. 1. При постановке задачи принимаются основные допущения: ярмо статора считается ненасыщенным ($\mu_c \rightarrow \infty$); магнитная проницаемость ротора машины считается постоянной ($\mu_r = \text{const}$); активная зона обмотки статора заменяется эквивалентным токовым слоем, расположенным на радиусе R_s с линейной плотностью тока J_0 , синусоидально распределенной по угловой координате j ; машина считается достаточно длинной ($L_s / t \gg 1$, где t – полюсное деление; L_s – активная длина СГ); зона ВТСП обмотки индуктора не содержит ферромагнитного сердечника.

В расчетах принимается, что обмотка возбуждения расположена на вращающемся роторе, имеет вид кольцевого цилиндра, разделенного по окружности на участки с разными направлениями токов по числу пар полюсов при равномерно распределенной плотности тока. Учет воздушных промежутков между обмотками полюсов можно учесть введением соответствующей ступенчатой функции с последующим ее разложением в ряд Фурье [3].

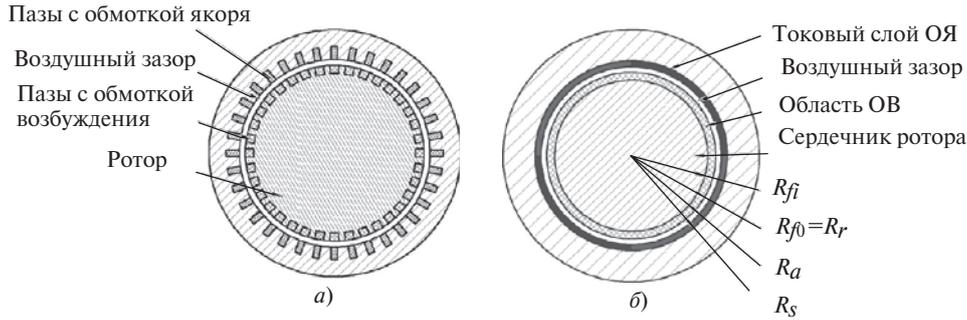


Рис. 1. Геометрия (а) и расчетная схема (б) синхронного генератора с электромагнитным возбуждением

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

$$\text{div } \vec{B} = 0, \text{rot } \vec{H} = J \quad (1)$$

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

$$[B_n] = 0, \frac{1}{r} \frac{\partial A_i}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial A_j}{\partial r}; \quad (2)$$

$$[H_t] = 0, -\frac{1}{\mu_0 \mu} \frac{\partial A_i}{\partial r} = \frac{1}{\mu_0 \mu} \frac{\partial A_j}{\partial r}, \quad (3)$$

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

Система (1) для стационарных двухмерных магнитных полей сводится к решению уравнения Пуассона относительно векторного магнитного потенциала [2]:

$$\Delta A = JP + \mu_0 J_0 \sin(pf) \delta(r - R_s), \quad (4)$$

где J – плотность тока в обмотке возбуждения; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума; $\delta(r - R_s)$ – дельта-функция; P – ступенчатая функция.

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 генератора можно выделить области, отличающиеся электрическими и магнитными свойствами (используется полярная система координат):

$0 \leq r \leq R_{fi}$ – сердечник ротора генератора ($\mu = \text{const}$);

$R_{f0} \leq r \leq R_s$ – область воздушного зазора ($\mu = 1$);
 $R_{fi} \leq r \leq R_{f0}$ – область, занятая ВТСП обмоткой индуктора ($\mu = 1$).

При необходимости поправка на параметры генератора за счет конечного размера зубцово-спинки статора может быть найдена из теории магнитных цепей [5].

Двухмерные магнитные поля в активной зоне СГ от токов индуктора. При расчете распределения магнитных полей от токов обмотки возбуждения влияние токового слоя обмотки якоря не учитывается. Расчетная конфигурация обмотки возбуждения ротора многополюсного синхронного генератора показана на рис. 2.

Решение уравнения (4) для первой гармоники ряда в различных областях машины при рассмотрении полей от токов обмотки возбуждения ротора имеет вид [3]:

в области сердечника ротора ($0 \leq r \leq R_{fi}$)

$$A_{rr} = d_1 r^p \sin(pj) + d_2 r^p \cos(pj), \quad (6)$$

где d_1, d_2 – неизвестные константы; p – число пар полюсов;

в области обмотки возбуждения ($R_{fi} \leq r \leq R_{f0}$)

$$A_f = \frac{2 \mu_0 w_f i_f}{\rho(R_{f0}^2 - R_{fi}^2) p(p+2)} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{r^{p+2}}{2-p} \right)$$

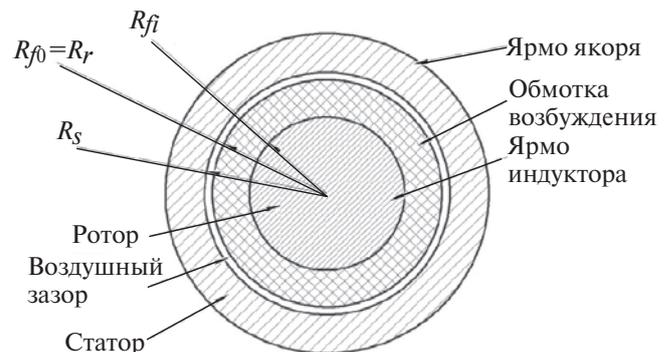


Рис. 2. Расчетная схема синхронного генератора от токов ОВ

$$-\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{R_{fi}}{r} \frac{\partial \dot{u}}{\partial r} \right) - \frac{2p}{2-p} \frac{\dot{u}}{r^2} + \frac{r^p}{R_s^{2p}} (R_{f0}^{p+2} - R_{fi}^{p+2}) \frac{\partial^2 \dot{u}}{\partial r^2} \sin(pj) + (e_1 \sin(pj) + e_2 \cos(pj)) r^p + (e_3 \sin(pj) + e_4 \cos(pj)) r^{-p}, \quad (7)$$

где w_f – число витков фазы ОВ; k_f – обмоточный коэффициент ОВ; p – число пар полюсов; e_1, e_4 – неизвестные константы, определяемые из граничных условий;

в области воздушного зазора ($R_{f0} \leq r \leq R_s$)

$$A_{dr} = \frac{2m_0 w_f i_f k_f}{p(R_{f0}^2 - R_{fi}^2)} \frac{k_f}{p(p+2)}$$

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{R_{f0}^{p+2} - R_{fi}^{p+2}}{r} \frac{\partial \dot{u}}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{R_{f0}^{p+2} - R_{fi}^{p+2}}{R_s^{2p}} \frac{\partial^2 \dot{u}}{\partial r^2} r^{-p} \sin(pj) \right) + (f_1 \sin(pj) + f_2 \cos(pj)) r^p + (f_3 \sin(pj) + f_4 \cos(pj)) r^{-p}, \quad (8)$$

где f_1, f_4 – неизвестные константы, определяемые из граничных условий.

Подставляя соответствующие выражения для векторного магнитного потенциала в граничные условия (2) и (3), можно получить систему из 10 линейных алгебраических уравнений. После преобразования и решения системы уравнений можно найти выражение для неизвестных констант в (6)–(8).

Полученные выше решения позволяют построить распределения векторного магнитного потенциала при различном числе пар полюсов p (рис. 3, а и б). Из рисунков видно, что при увеличении числа пар полюсов распределение векторного магнитного потенциала становится существенно неоднородным. При этом при больших значениях p распределение локализовано в основном в области воздушного зазора и с увеличением сердечника ротора быстро затухает по радиусу.

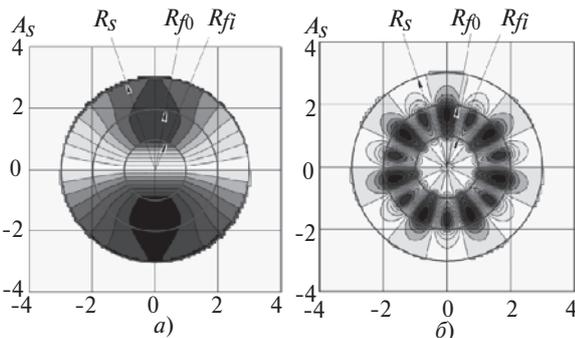


Рис. 3. Распределение магнитных полей от ОВ в активной зоне СГ при числе пар полюсов $p=1$ (а) и $p=7$ (б)

Двухмерные магнитные поля в активной зоне СГ от токового слоя статора. При расчете распределения магнитных полей от токового слоя обмотки якоря влияние токов обмотки возбуждения не учитывается. Расчетная схема магнитных полей от обмотки якоря многополюсного синхронного генератора показана на рис. 4.

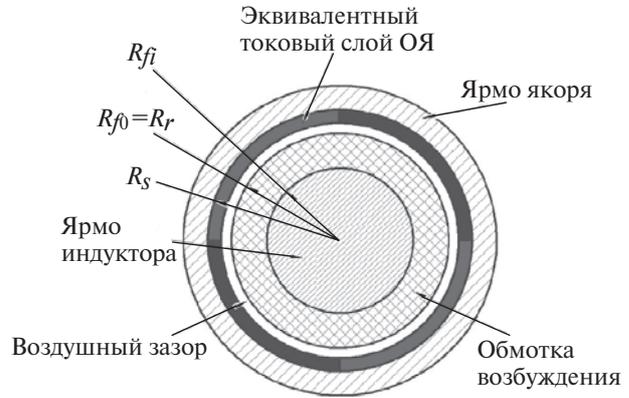


Рис. 4. Расчетная схема магнитных полей от токового слоя якоря

Решение уравнения (4) для первой гармоники ряда в различных областях машины при рассмотрении полей от токового слоя обмотки якоря [2]: в области воздушного зазора ($R_{f0} \leq r \leq R_s$)

$$A_{sd} = \frac{m_0 m i_m w_a k_a}{2pp} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{R_{f0}^{p+2} - R_{fi}^{p+2}}{r} \frac{\partial \dot{u}}{\partial r} \right) + a_p r^p + a_p \frac{R_s^{2p}}{r^p} - \frac{R_s^p}{r^p} \frac{\partial \dot{u}}{\partial r} \right] \sin(pf) + c_p \frac{R_s^{2p}}{r^p} \frac{\partial^2 \dot{u}}{\partial r^2} \cos(pf) \frac{\partial \dot{u}}{\partial r}, \quad (9)$$

где i_m – амплитудное значение тока фазы ОЯ; m – число фаз; w_a – число витков фазы якоря; k_a – обмоточный коэффициент ОЯ; a_p, c_p – неизвестные константы, получаемые из граничных условий;

в области обмотки возбуждения ($R_{fi} \leq r \leq R_{f0}$)

$$A_{sf} = (t_1 \sin(pj) + t_2 \cos(pj)) r^p + (t_3 \sin(pj) + t_4 \cos(pj)) r^{-p}, \quad (10)$$

где t_1, t_4 – неизвестные константы, получаемые из граничных условий;

в области сердечника ротора ($0 \leq r \leq R_{fi}$) [2]

$$A_{sr} = c_1 r^p \sin(pj) + c_2 r^p \cos(pj), \quad (11)$$

где c_1, c_2 – неизвестные константы, получаемые из граничных условий.

Подставляя соответствующие выражения для векторного магнитного потенциала в граничные условия (2) и (3), можно получить систему линей-

ных алгебраических уравнений. После несложных преобразований и решения системы уравнений можно найти выражения для неизвестных констант в (9)–(11).

Распределение векторного магнитного потенциала в активной зоне синхронной машины от токового слоя якоря при различном числе пар полюсов p аналогично распределению, полученному от обмотки возбуждения.

Двухмерные магнитные поля в активной зоне СГ от токов обмоток якоря (ОЯ) и возбуждения (ОВ). Подставляя полученные ранее аналитические выражения для векторного магнитного потенциала от токов ОЯ и ОВ для соответствующих областей в выражение (5) и учитывая, что $R_{f0} = R_r$, получаем аналитический вид распределения векторного магнитного потенциала в активной зоне СГ от токов этих обмоток:

$$A = \begin{cases} \dot{A}_{sr}(r, j) + A_{rr}(r, j + g), & 0 < r < R_{fi}; \\ \dot{A}_{sf}(r, j) + A_f(r, j + g), & R_{fi} < r < R_r; \\ \dot{A}_{sd}(r, j) + A_{dr}(r, j + g), & R_r < r < R_s, \end{cases} \quad (12)$$

где g – угол поворота магнитных полюсов ротора относительно магнитных полюсов статора.

Из примера на рис. 5, *a* и *б* видно, что на холостом ходу распределение магнитного поля симметрично относительно положения полюсов, при нагрузке в распределении полей появляются тангенциальные составляющие магнитных полей $B_t = -\partial A / \partial r$.

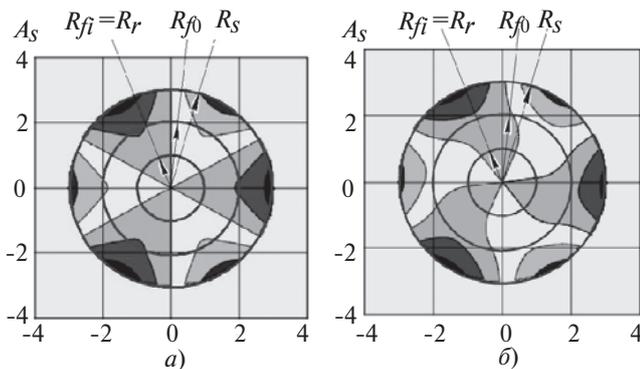


Рис. 5. Распределение суммарных магнитных полей в активной зоне СГ при $g = 0^\circ$ (а) и $g = 30^\circ$ (б), $p = 3$

ЭДС и индуктивные параметры СГ с обмоткой возбуждения. Расчет выходных энергетических параметров синхронного ВТСП генератора проводится на основе обобщенной векторной диаграммы для синхронных машин [5]. Здесь рассматривается неявнополюсный синхронный генератор с распределенной обмоткой на статоре и роторе, у которого сопротивления по осям d и q равны [5]. Важнейшими параметрами машины являются ЭДС холостого хода E_0 и главное индуктивное сопротивление X_a .

Рис. 6. Зависимости коэффициента мощности, тока якоря и выходной мощности от угла нагрузки φ

Рис. 6. Зависимости коэффициента мощности, тока якоря и выходной мощности от угла нагрузки φ

$$X_a = f \frac{L_s w_a^2 k_a^2 m_0 m}{p} T; \quad (13)$$

$$E_0 = 4\sqrt{2} p k_a w_a f L_s G ((R_{f0}^{p+2} - R_{fi}^{p+2}) R_s^{-p} + \frac{K_m}{R_s^{2p} - R_{fi}^{2p}} \frac{\infty}{K_m} R_{fi}^{p+2} R R_s^p \frac{2+p}{2-p} + R_{f0}^{p+2} R_{fi}^{2p} R_1 R_s^{-p} \frac{\infty}{\omega}) \quad (14)$$

где L_s – активная длина машины; f – частота.

Расчет ЭДС холостого хода и главного индуктивного сопротивления в зависимости от числа пар полюсов показывает, что с ростом p значения E_0 и X_a уменьшаются.

На основе векторной диаграммы в двигательном режиме, принимая активное сопротивление R равным нулю, можно получить также зависимости для коэффициента мощности $\cos \varphi$, тока фазы I и электромагнитной мощности P_2 [6]:

$$\cos \varphi = \frac{E_0 \sin(\varphi)}{\sqrt{(U \cos(\varphi) - E_0)^2 + (U \sin(\varphi))^2}}; \quad (15)$$

$$I(\varphi) = \frac{\sqrt{(U \cos(\varphi) - E_0)^2 + (U \sin(\varphi))^2}}{X^2}; \quad (16)$$

$$P_2(\varphi) = \frac{m U E_0}{X} \sin(\varphi), \quad (17)$$

по которым на рис. 6 построены угловые характеристики машины в двигательном режиме.

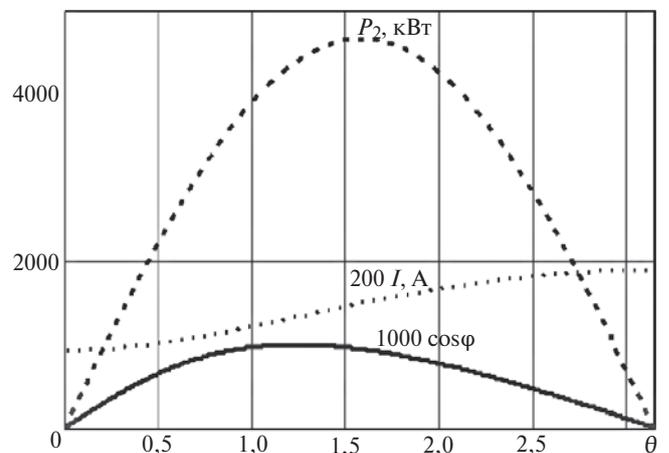


Рис. 6. Зависимости коэффициента мощности, тока якоря и выходной мощности от угла нагрузки φ

На рис. 7 показана внешняя характеристика (зависимость выходного напряжения от тока статора) [6]:

$$U = \sqrt{E_0^2 - (X_a I)^2 \cos(j)} - X_a I \sin(j), \quad (18)$$

где j – угол нагрузки: $j = 0$, $j < 0$ и $j > 0$ – соответственно для активной, емкостной и индуктивной нагрузки.

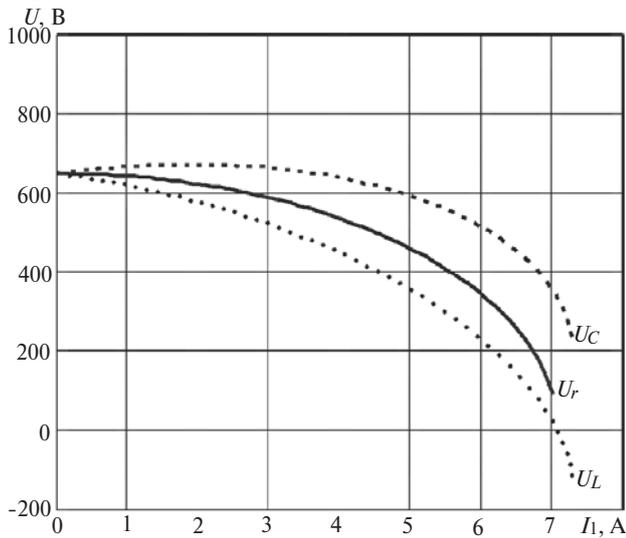


Рис. 7. Внешние характеристики генератора при активной, индуктивной и емкостной нагрузке

Сравнительная характеристика СГ с ПМ и ОВ. В [1] изложена методика расчета и оценки параметров СГ с возбуждением от постоянных магнитов. Используя эти данные, можно провести сопоставление зависимостей (13)–(17) данной работы с аналогичными параметрами электрических машин с ПМ.

Сравнительный анализ проводился для генератора в двигательном режиме. За исходные были приняты параметры ВТСП двигателя мощностью 200 кВт для электротранспорта, разработка которого введется в Московском авиационном институте:

номинальная мощность, кВт	200
номинальное напряжение питания, В	450
частота питающего напряжения, Гц	75
число фаз	3
диаметр расточки статора, мм	340
внешний диаметр ОВ, мм	328
внутренний диаметр ОВ, мм	220
число витков ОВ	400
активная длина машины, мм	220
число витков ОЯ	48

Конструктивные параметры машины с постоянными магнитами и электромагнитным возбуждением были выбраны одинаковыми.

Выполненные авторами расчеты выходной мощности двигателей с ПМ и электромагнитным возбуждением на роторе при различных значениях тока в ВТСП обмотках показали, что при значениях тока в ВТСП токонесящих элементах, близких к 100 А, удается превзойти параметры машины с ПМ. Учитывая свойства современных ВТСП проводов, можно увеличить их токонесящую способность, понизив температуру ниже 77 К. Таким образом, можно заключить, что синхронный генератор с электромагнитным возбуждением на основе ВТСП проводов второго поколения при температурах жидкого азота имеет более выгодные характеристики по сравнению с машинами на основе ПМ, а при температурах ниже 77 К значительно их превосходит.

Выводы. 1. На основе аналитического решения задач о распределении двумерных магнитных полей в активной зоне машины получены аналитические соотношения для расчета главного индуктивного сопротивления и ЭДС холостого хода СГ со сверхпроводниковой ОВ. Найденные аналитические решения для выходных параметров электрической машины со сверхпроводниковой ОВ позволяют проводить детальные расчеты выходных характеристик синхронной машины с учетом числа пар полюсов, размеров обмотки возбуждения и режима работы генератора.

2. На основе разработанной в статье методики можно получить аналитические выражения для распределения магнитных полей в активной зоне синхронного генератора обращенной конструкции применительно к их использованию в электроэнергетических установках. Методика позволяет в совокупности с результатами расчета синхронного генератора с постоянными магнитами [1] установить взаимосвязь между МДС постоянного магнита и обмотки возбуждения. Появляется возможность оценить эффективность использования тех или иных типов машин (с ПМ или с электромагнитным возбуждением на основе ВТСП проводов). Установлено, что конструкция СГ со сверхпроводниковой ОВ перспективна при использовании ВТСП токонесящих элементов при температурах жидкого азота (77К и ниже).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковалев Л.К., Ковалев К.Л., Тулинова Е.Е., Иванов Н.С. Многополюсные синхронные генераторы с постоянными магнитами для ветроэнергетических установок. – Электричество, 2013, № 8, с. 2–8.
2. Ковалев Л.К., Ковалев К.Л., Конев С.М.-А. Электрические машины и устройства на основе массивных высокотемпературных сверхпроводников. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010, 396 с.
3. Казовский Е.Я., Карцев В.П., Шахтарин В.Н. Сверхпроводящие магнитные системы. – М.: Наука, 1967, 323 с.

4. **Иванов-Смоленский А.В.** Электрические машины, том 2. — М.: Изд-во Московского энергетического института, 2006, 532 с.
5. **Бут Д.А.** Основы электромеханики. — М.: Изд-во Московского авиационного института, 1996, 468 с.
6. **Алиевский Б.Л.** Специальные электрические машины, кн. 1. — М.: Энергоатомиздат, 1993, 320 с.

[30.01.14]

Авторы: Ковалев Лев Кузьмич окончил факультет «Энергомашиностроение» Московского высшего технического училища им. Баумана в 1964 г. и механико-математический факультет Московского государственного университета в 1968 г. В 1996 г. защитил докторскую диссертацию по авиационно-космической электроэнергетике в Московском авиационном институте (МАИ). Профессор, заведующий кафедрой «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» МАИ. Скончался в 2014 г.

Ковалев Константин Львович окончил в 1993 г. факультет «Экспериментальная и теоретическая физика» Московского инженерно-физического института. В 2005 г. защитил в Московском энергетическом институте докторскую диссертацию по сверхпроводниковым электрическим машинам. Профессор, ведущий научный сотрудник кафедры «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» МАИ.

Иванов Николай Сергеевич окончил факультет «Системы управления, информатика и электроэнергетика» МАИ в 2011 г. Инженер кафедры «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» МАИ.

Тулинова Екатерина Евгеньевна окончила факультет «Системы управления, информатика и электроэнергетика» МАИ в 2011 г. Младший научный сотрудник кафедры «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» МАИ.

An Analytical Procedure for Calculating the Magnetic Field Distribution in the Active Zone of Electromagnetically Excited Synchronous Generators Used in Independent Electric Power Installations

L.K. KOVALEV, K.L. KOVALEV, N.S. IVANOV and E.E. TULINOVA

An analytical procedure for calculating 2D magnetic fields in the active zone of a nonsalient-pole synchronous generator with the field winding installed in the inductor on the rotor is presented. Analytical dependences for the EMF and generator main inductive reactance are obtained. Prospects of using an inverted design of synchronous machines in electric power installations are discussed. When taken in combination with the previously developed analytical procedure for calculating a permanent-magnet synchronous generator described in [1], the developed approach makes it possible to establish a correlation between the magnetic motive force (MMF) of the permanent magnet and the MMF of the field winding made of copper or high-temperature superconductors. By applying this approach it is possible to estimate the effectiveness of using some or other types of machines (with permanent magnets or with electromagnetic excitation) and determine under what cooling conditions different types of machines have the highest power capacity of a single set.

Key words: synchronous generator, electromagnetic excitation, 2D magnetic fields, high-temperature superconducting elements, capacity of a single set

REFERENCES

1. **Kovalev L.K., Tulinova E.E., Ivanov N.S.** *Elektrichestvo (Electricity)*, 2013, № 8, pp. 2–8
2. **Kovalev L.K., Kovalev K.L., Koneyev S.M.-A.** *Elektricheskie mashiny i ustroystva na osnove massivnykh vysokotemperatirnykh sverkhprovodnikov* (Electrical machines and devices on the basis of bulk high-temperature superconductors). Moscow. Publ. «FIZMATLIT», 2010, 396 p.
3. **Kazovskii E.Ya., Kartsev V.P., Shakhtarin V.N.** *Sverkhprovodyashie magnitnye sistemy* (Superconducting magnetic systems). Moscow. Publ. «Science», 1967, 323 p.
4. **Ivanov-Smolenskii A.V.** *Elektricheskie mashiny, t. 2* (Electrical machines, vol. 2). Moscow. Publ. of the Moscow Power Institute, 2006, 532 p.
5. **But D.A.** *Osnovy elektromekhaniki* (Basis of Electromechanics). Moscow. Publ. of the Moscow Aviation Institute, 1996, 468 p.
6. **Aliyevskii B.L.** *Spetsial'nye elektricheskie mashiny* (Special Electrical Machines. Part 1). Moscow. Publ. «Energoatomizdat», 1993, 320 p.

Authors: Kovalyev Lev Kuz'mich graduated from the N.E. Bauman MGTU in 1964 and the Moscow State University in 1968. In 1996 he received the degree of Doctor Techn. Sci. from the Moscow Aviation Institute (MAI). He died in 2014.

Kovalyev Konstantin Lvovich graduated from the Moscow Engineering–Physics Institute in 1993. In 2005 he received the degree of Doctor Techn. Sci. from the Moscow Power Engineering Institute. He is a Professor and Scientific Researcher of the MAI.

Tulinova Ekaterina Evgen'yevna graduated from the MAI in 2011. She is a Junior Researcher of the MAI.

Ivanov Nikolai Sergeevich graduated from the MAI in 2011. He is a Engineer of the MAI.

