

УДК 621.318.1

Е.И. Зарицкая, А.М. Олейников, В.А. Яровенко

РАСЧЕТ ТИХОХОДНЫХ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ
С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Предложен алгоритм оптимизационного расчета синхронных генераторов с постоянными магнитами. В расчете учитывается реальная картина распределения магнитных полей, кривые намагничивания электротехнических материалов, рабочие диаграммы магнитов. В основе расчета лежит движение по градиенту. Результаты испытаний опытного образца генератора подтвердили высокие технико-экономические показатели преобразования энергии.

Ключевые слова: синхронные генераторы с постоянными магнитами, оптимизационный расчет, опытное подтверждение результатов расчета.

Запропоновано алгоритм оптимізаційного розрахунку синхронних генераторів з постійними магнітами. В розрахунок враховується реальна картина розподілу магнітних полів, криві намагнічування електротехнічних матеріалів, робочі діаграми магнітів. В основу розрахунку закладено рух за градієнтом. Результати випробувань опитного зразку генератора підтвердили високі техніко-економічні показники перетворювання енергії.

Ключові слова: синхронні генератори з постійними магнітами, оптимізаційний розрахунок, опитне підтвердження результатів розрахунків.

There is algorithm optimization calculation of synchronous generators with permanent magnets was offered in this article. The calculation takes into account the real picture of the distribution of the magnetic field, the magnetization curves of electrical materials, magnets diagrams. The calculation is based on a gradient method. The test results of the prototype generator confirmed the high technical and economic indices of energy transformation.

Keywords: synchronous generators with permanent magnets, optimization calculations, experimental confirmation of the results of calculation.

Актуальность задачи. В методике проектирования [3] синхронных генераторов (СГ) с постоянными магнитами (СГПМ) узловыми исходными варьируемыми параметрами выступают комбинации геометрических размеров активного ядра машины (диаметра расточки статора D_i , активной длины L_i , воздушного зазора δ), электромагнитных нагрузок

© Зарицкая Е.И., Олейников А.М., Яровенко В.А., 2015

(линейной нагрузки A_1 , индукции в зазоре B_δ и плотности тока в обмотке статора j_1) и обмоточных данных статора (числа q_1 , числа витков фазы W_1 , числа параллельных ветвей $a_{пв}$, сечения проводников и т.д.), а также соотношение размеров. Поэтому выбор основных геометрических размеров (L_i и D_i) проектируемого генератора приобретает большое значение. Его приходится проводить, основываясь на опыте проектирования подобных машин с электромагнитным возбуждением, а также с учетом принятых в электромашиностроении стандартных высот оси вращения. При этом необходимо учитывать реально применяемые для подобных машин вырубку листов электротехнической стали или возможности организации единичной штамповки таких листов.

Что касается электромагнитных нагрузок, то в СГПМ сразу задать точные значения A_1 и B_δ не представляется возможным, т.к. в реальной машине они зависят от типа, характеристик и степени использования магнитов, необходимый объем которых зависит как от расчетной мощности и характера нагрузки, так и от типа магнитной системы СГ. Кроме того, следует принимать во внимание возможное значение максимальной мощности, достигаемой при перегрузках или коротких замыканиях.

Целью настоящей работы является разработка алгоритма автоматизированного оптимизационного расчета синхронных генераторов с постоянными магнитами.

Изложение основного материала. Алгоритм расчета включает в себя следующие этапы.

1. Ввод исходных данных.

В задании на проектирование синхронных машин, как правило, задаются:

- число фаз обмотки статора m и схема их соединения Y/Δ ;
- номинальная частота вращения n_n , об/мин и частота тока f_n , Гц;
- номинальные активная мощность P_n , Вт и фазное напряжение U_n , В;
- коэффициент мощности $\cos \varphi$ при номинальной частоте вращения;
- допускаемая температура перегрева обмотки статора $\theta_{доп}$;
- марки электротехнических и конструкционных сталей;
- исходные параметры постоянных магнитов: марка, остаточная индукция B_r , температура точки Кюри T_K ; коэрцитивная сила H_C , кА/м; энергетическое произведение $W_{max} = (BH)_{max}$, $\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}$.

2. Расчет и построение рабочей диаграммы магнита с определением области максимальной энергии и точки возврата.

Рабочим участком постоянного магнита (ПМ), используемым при расчете СГ, является кривая размагничивания, расположенная во втором квадранте, как часть петли гистерезиса, полученной при намагничивании ПМ и перемагничивании его до состояния насыщения [4]. Она характеризуется следующими параметрами (рис. 1, а): B_r – остаточная индукция; H_{CB} и H_{CJ} – коэрцитивные силы по индукции и по намагнитченности; $(BH)_{max}$ – максимальное значение произведения BH ; β – коэффициент выпуклости кривой

$$\beta = \frac{(BH)_{max}}{B_r H_{CB}}. \quad (1)$$

К важным характеристикам постоянных магнитов относят также рабочую температуру $\theta_p, ^\circ\text{C}$ и температуру точки Кюри $\theta_k, ^\circ\text{C}$.

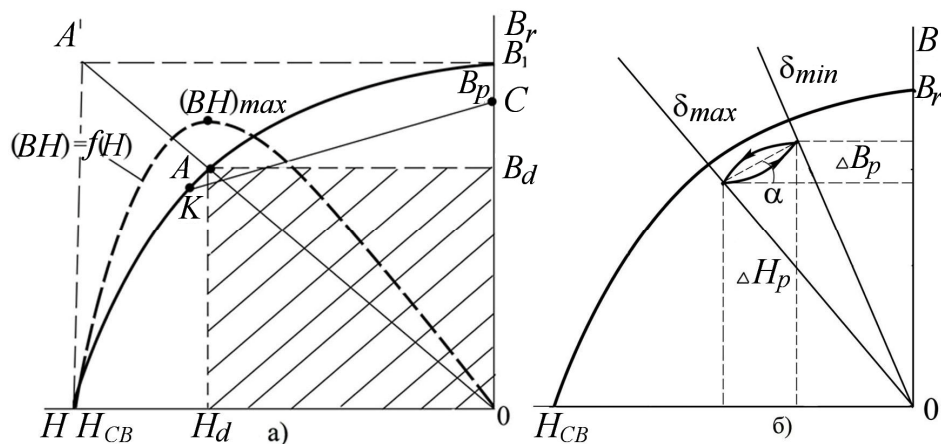


Рис. 1. Рабочая диаграмма магнита:
а) кривая размагничивания; б) предельные значения воздушного зазора

Исходя из имеющихся параметров постоянного магнита, кривая размагничивания $B = f(H)$, используемая при расчете СГ, представляется уравнением равнобокой гиперболы в виде

$$B = B_r (H_{CB} - H) / (H_{CB} - \alpha_0 H), \quad (2)$$

где α_0 – коэффициент, характеризующий асимптоту гиперболы

$$\alpha_0 = B_r / B_s = \frac{2\sqrt{\beta - 1}}{\beta},$$

B_s – индукция насыщения.

Кривая $BH = f(H)$ на рис. 1, а определяет энергию поля, запасаемую в воздушном зазоре при различных значениях B и H . Макси-

мальное значение энергии поля $(BH)_{max}$ достигается в точке A , которая получается при пересечении линии OA' (линии среза) с кривой размагничивания. Заштрихованная на рис. 1, a область отражает максимальную удельную энергию

$$W_{max} = \frac{(BH)_{max}}{2}. \quad (3)$$

Величина $(BH)_{max}$ рассматривается как основной критерий качества ПМ, а по наклону линии OA' к оси H можно судить о лучшем соотношении толщины магнита h_m и его поперечного сечения $S_m = b_m l_m$ (b_m и l_m – ширина и длина магнита).

Принципиальное значение в процессе построения рабочей диаграммы ПМ (и расчета СГ) приобретает выбор рабочей точки – точки, из которой строится линия возврата (линия KC на рис. 1, a). Наилучшим вариантом такого выбора является зона вблизи точки $(BH)_{max}$.

Имея координаты точки отхода прямой возврата B_K и H_K , можно записать уравнение линии возврата в виде

$$B = B_K + \mu_g (H_K - H), \quad (4)$$

где μ_g – магнитная проницаемость магнита на прямой возврата

$$\mu_g = B_r (1 - \alpha_0) / H_c. \quad (5)$$

Линия возврата является по существу внешней характеристикой магнита, и ее вид определяет характеристики СГ при изменении режима работы. Точка пересечения прямой возврата с осью B определяет кажущуюся индукцию B_p , а произведение $B_p H_d$ определяет внутреннюю энергию единицы объема ПМ.

3. Аппроксимация кривых намагничивания материалов для участков магнитной цепи синхронного генератора.

В настоящее время известны различные способы аппроксимации, которые касаются как непосредственно кривых намагничивания ферромагнитных материалов, так и характеристик намагничивания электрических машин или отдельных элементов их магнитных цепей (ярма, зубцов и т. д.).

При выборе аналитического выражения для зависимости $B = f(H)$, предложено воспользоваться соображениями физической интерпретации процесса намагничивания [5], т.е. учитывать то обстоятельство, что при увеличении напряженности поля выше области перегиба кривой (в зоне насыщения) индукция теоретически стремится к индукции насыщения B_s . Индукция насыщения изменяется по линейному закону, подчиняясь уравнению $B_s = aH + b$. В этом случае дифференциальная магнитная прони-

цаемость $\frac{dB}{dH}$ стремится к постоянной a . То есть, $\frac{dB}{dH} - a \rightarrow 0$ при $H \rightarrow \infty$. Величина $(B_s - B)$ при $H \rightarrow \infty$ также стремится к нулю. Поэтому $(\frac{dB}{dH} - a)$ и $(B_s - B)$ можно связать между собой зависимостью

$$\frac{dB}{dH} - a = k(aH + b - B)^r, \quad (6)$$

где r – показатель степени.

После соответствующих преобразований, получим следующие аппроксимирующие уравнения:

– при $r \neq 1$

$$B(H) = aH + b + \frac{k}{(H + c)^s}; \quad (7)$$

– при $r = 1$

$$B = aH + b - ce^{-aH}. \quad (8)$$

4. Предварительный выбор геометрических размеров и электромагнитных нагрузок.

Для предварительного выбора геометрии проектируемого тихоходного СГ, используются [2] следующие основные соотношения.

Полная мощность, число пар полюсов обмотки и число пазов статора

$$S_n = \frac{P_n}{\cos \varphi_n}; \quad p = \frac{60 f_n}{n_n}; \quad Z_1 = 2 p m q_1.$$

Диаметр расточки статора $D_i = \frac{t_{z1} Z_1}{\pi}$ и полюсное деление $\tau = \frac{\pi D_i}{2p}$,

выбираются в зависимости от заданной мощности P_n и числа пар полюсов p по рекомендациям [1]. При этом должно выполняться, как правило, приемлемое соотношение для зубцового деления в пределах не менее $t_{z1} \approx 10,5 \dots 12 \text{ мм}$ при соотношениях для ширины зубца b_{z1} и паза h_{n1} в зоне расточки статора в пределах $b_{z1} = 0,45 \dots 0,5 t_{z1}$, $b_{n1} = 0,55 \dots 0,5 t_{z1}$. С учетом большого числа пазов Z_1 , зубцовое деление t_{z1} приходится выбирать минимальным. При этом значения b_{z1} и h_{n1} должны отвечать технологическим и конструктивным требованиям, а магнитная индукция в зубцах не должна превышать величину насыщения.

Расчетный коэффициент полюсного перекрытия $\alpha_{\delta p}$ определяется по следующим соотношениям:

– для сборного ротора типа «звездочка» и для коллекторного ротора

$$\alpha_{\delta p} = \alpha_{\delta} K_{\phi 1}; \quad (9)$$

– для цилиндрического ротора типа «звездочка»

$$\alpha_{\delta p} = 2K_{\phi 1}/\pi, \quad (10)$$

где $K_{\phi 1}$ – коэффициент, учитывающий изменение формы поля из-за насыщения зубрового слоя [1]

$$K_{\phi 1} = K_{\mu} \frac{\pi}{2,2\sqrt{2}}. \quad (11)$$

Активная длина расточки статора, воздушный зазор и диаметр ротора определяются по соотношениям

$$L_i = \frac{6,1S_n}{\alpha_{\phi} k_{\phi\sigma} A_1 B_{\delta 0} D_i^2 n_n}; \quad \delta = (2 \dots 2,5) 10^{-3} D_i; \quad D_p = D_i - 2\delta,$$

а наружный диаметр сердечника статора – $D_a = D_i / K_D$,

где K_D – стандартный коэффициент для вырубков электротехнической стали.

Диаметр вала рассчитывают по соотношению

$$D_b = \sqrt{K_{кз} \frac{S_n 30}{\pi n_n \sigma_n}}. \quad (12)$$

При назначении электромагнитных нагрузок следует исходить из накопленного опыта проектирования СГПМ и рекомендаций различных источников. В качестве предварительных значений можно принимать:

- для линейной нагрузки $A_1 = 2,5 \dots 3,5$ А/м;
- для плотности тока в обмотке статора $j = 4 \dots 5,5$ А/мм²;
- для магнитной индукции в зазоре при холостом ходе $B_{\delta 0} = k_r B_r$, ($k_r = 0,68 \dots 0,75$).

Окончательное решение по этим параметрам может быть сделано по результатам моделирования, построения рабочей диаграммы магнита, внешней характеристики и последующего определения энергетических показателей, получаемых в процессе оптимизационного расчета.

5. Построение геометрической модели магнитной цепи и моделирование картины поля в программных комплексах.

При расчете синхронной машины представление о характере распределения магнитного поля и знание величины магнитного потока Φ_0 в магнитной цепи СГ необходимы для определения числа витков фазы статора при заданном значении ЭДС

$$W = E / (4k_B \Phi_0 f k_{\phi\sigma}), \quad (13)$$

где $k_B = B_{\delta 1} / B_{\delta cp}$ – коэффициент формы ЭДС ($B_{\delta 1}$ – действующее значение индукции первой гармоники, $B_{\delta cp}$ – средняя индукция в зазоре);

$k_{об}$ – обмоточный коэффициент.

Информация о магнитном поле необходима также для учета действия высших гармоник и полей рассеяния на характеристики генератора при различных режимах работы.

Оценка поля рассеяния ПМ в процессе расчета магнитной цепи, так же как и максимально точное определение параметров поля в зазоре машины с постоянными магнитами, представляет весьма ответственную, и достаточно трудную задачу. Для расчета магнитной индукции предложено использовать непосредственный расчет магнитного поля, основанный на решении уравнений Максвелла.

Для анализа магнитной системы СГПМ принимаются допущения: электромагнитные процессы в машинах носят квазиустановившийся характер; магнитная проницаемость по различным осям одинакова; токи смещения и пространственные заряды отсутствуют.

С учетом этих допущений уравнения магнитного поля будут иметь вид

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{j}; \quad \operatorname{div} \mathbf{B} = 0. \quad (14)$$

Решение уравнений (14) упрощается с использованием векторного магнитного потенциала \mathbf{A}

$$\mathbf{B} = \operatorname{rot} \mathbf{A}. \quad (15)$$

Для постоянных магнитов справедливо соотношение $\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{M} + \mathbf{H})$. Для них принимаются допущения: намагниченность магнита отличается от нуля только вдоль основной оси намагничивания и зависит только напряженности магнитного поля вдоль этой оси; у высококоэрцитивных постоянных магнитов намагниченность постоянна; магнитная проницаемость постоянных магнитов по всем координатам одинакова и равна магнитной проницаемости по главной оси намагничивания.

Уравнения магнитного поля с учетом неоднородности магнитного поля и нелинейных магнитных свойств ферромагнетиков, с учетом допущения $\operatorname{div} \mathbf{A} = 0$, принимают соответственно для свободных от тока областей, областей с током (с обмотками) и постоянных магнитов вид

$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \mathbf{A} \right) = 0; \quad \operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \mathbf{A} \right) = -\mathbf{j}; \quad \operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \mathbf{A} \right) = -\mathbf{j} - \operatorname{rot} \mathbf{M}, \quad (16)$$

где μ – абсолютная магнитная проницаемость; \mathbf{M} – вектор намагниченности; \mathbf{j} – плотность тока.

Для численного решения рекомендуется программный комплекс ELCUT, в котором реализован метод конечных элементов. Методика расчета строится на основе уравнения Пуассона. Оно обобщено на всю магнитную систему СГПМ, а его правая часть ненулевая в областях с током и постоянными магнитами. Уравнения Пуассона в заданной области реша-

ются при заданных граничных условиях – известном на границе потенциале или производной потенциала.

Результаты численного моделирования распределения магнитного потока в воздушном зазоре и в пазах статора предлагается аппроксимировать квадратичными или кубическими полиномами. Для этого по результатам моделирования магнитного поля формируется матрица значений магнитной индукции (или потока) в заданных участках магнитной цепи и таким образом представляется общая картина распределения поля. Для его описания разработана математическая модель, позволяющая рассчитать магнитный поток в любой зоне магнитной цепи.

При аппроксимации в среде Mathcad зависимость магнитного потока Φ от плотности тока статора j и относительной глубины проникновения магнитного поля в сердечник h представляется многочленом третьей степени (относительно переменных j и h) вида

$$\begin{aligned} \Phi(j, h) = & 2,636 \cdot 10^{-6} j h^2 - 1,592 \cdot 10^{-6} h^3 + 2,29 \cdot 10^{-5} h^2 - 7,882 \cdot 10^{-5} h - 4,585 \cdot 10^{-5} j h + \\ & + 4,403 \cdot 10^{-7} j^2 h + 6,121 \cdot 10^{-3} - 1,505 \cdot 10^{-4} j - 2,651 \cdot 10^{-6} j^2 - 6,867 \cdot 10^{-7} j \end{aligned} \quad (17)$$

Погрешность аппроксимации не превышает 0,5-0,7 %.

Достоинством такого метода является возможность определения значения магнитного потока в любой точке, охватываемой массивом зоны, при любом режиме работы машины. Абсолютная погрешность в таких случаях не превышает 1-1,5% для основного магнитного потока и 1,5-2,4% – для потоков рассеяния.

6. Предварительный (инженерный) расчет синхронного генератора.

Предварительный расчет СГ производится в соответствии с принятыми методиками расчета электрических машин переменного тока. При этом учитываются особенности физических процессов, протекающих в машинах с постоянными магнитами [1]. Такой расчет включает в себя: определение обмоточных данных статора и размеров его зубцовой зоны; расчет объема и размеров постоянных магнитов, а также их рассеяния; расчет параметров схемы замещения, реакции якоря и короткого замыкания; построение рабочей диаграммы магнита и на ее основе – расчет номинального режима работы СГПМ и его внешней характеристики.

В расчетах используются результаты моделирования магнитных полей. Построение рабочей диаграммы магнита и внешней характеристики осуществляется с необходимыми корректирующими поправками. Кроме того, определяются потери в генераторе и его КПД, производится тепловой расчет СГПМ.

В процессе расчета определяются объем и размеры постоянных магнитов. Кроме того, находится конфигурация зубцовой зоны статора генератора. Размеры сердечника D_i и D_a выбираются исходя из необходимости размещения расчетного числа пазов. При этом, ширина зубца выбирается минимальной (не менее $b_z = 6$ мм), исходя из возможности раз-

мещения на нем ребра жесткости и одновременно – обеспечения заданной магнитной индукции. Размеры пазов (ширины b_z и высоты h_n) рассчитывают так, чтобы было обеспечено размещение расчетного числа проводников обмотки статора.

Число эффективных витков фазы обмотки и их распределение по пазам, параметры фазы (сопротивления r_1 и x_l) рассчитываются по известным формулам. Проверка соответствия необходимой S_n и расчетной S_{np} площади паза в свету проводится по соотношению

$$S_n - S_{np} \leq 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Если данное условие выполняется, расчет СГПМ может быть продолжен, в противном случае проводится корректировка в выборе геометрических размеров D_i, D_a, L_i и размеров пазов.

7. Оптимальный выбор варьируемых параметров.

Целью оптимизации является обеспечение максимального коэффициента полезного действия η при ограничении температуры перегрева обмотки статора $\theta_{cm.\dot{don}} \geq \theta_{cm.cp}$ и условия возможности расположения обмотки в пазу статора $S_n + \Delta S \leq S_{n.cв}$, где ΔS – запас площади. В качестве варьируемых параметров принимаются (с обычными для машин средней мощности пределами изменений): A_1 ($2 \cdot 10^4 \leq A_1 \leq 4 \cdot 10^4$); B_r ($0,6 \leq B_r \leq 1,25$); h_m ($0,003 \leq h_m \leq 0,01$); j_1 ($3 \leq j_1 \leq 7$), (здесь A_1 измеряется в А/м; B_r – в Тл; h_m – в м; j_1 – в А/мм²).

Функция критерия оптимальности сформулирована в виде $J = 1 - \eta$, т.е. при максимальном КПД критерий J достигает минимума, а ограничения на оптимизируемые параметры, на температуру и площадь паза введены методом штрафных функций, которые увеличивают значение J при нарушении ограничений.

Таким образом, функция критерия оптимальности принимает вид

$$J = 1 - \eta + \sum_{i=1}^{10} k_i g_i, \quad (18)$$

где k_i – весовые коэффициенты, выбираемые из соображений примерно-го равенства слагаемых в функции критерия (18).

Задача оптимизации сводится к минимизации функции критерия (18) методами минимизации функций нескольких переменных без ограничений.

В основу разработанного метода параметрической оптимизации [2], положен метод Дэвидона-Флетчера-Пауэлла. Для реализации процесса оптимального выбора параметров необходимо определить градиент функции (18). В рассматриваемой задаче градиент представляет четырехмерный вектор с компонентами, равными частным производным функции

критерия (18) по параметрам: линейная нагрузка A_1 ; индукция B_r ; высота h_m постоянного магнита и плотность тока j_1 .

В соответствии с представленной выше методикой, был выполнен оптимизационный расчет тихоходного синхронного генератора на постоянных магнитах. Это – синхронный генератор мощностью 20 кВт (полная мощность $S_n = 22,9$ кВА). Номинальная частота вращения генератора $n_n = 125$ об./мин., частота тока при номинальной скорости вращения $f_n = 50$ Гц, номинальное фазное напряжение $U_n = 220$ В. Используемые магниты имеют остаточную индукцию $B = 1,23$ Тл, коэрцитивную силу $H_c = 860$ кА/м и энергетическое произведение $BH_{max} = 380$ кДж/м³. Оптимальное значение КПД генератора составило $\eta_{max} = 0,877$.

По результатам расчетов был создан опытный образец генератора. На рис. 2 приведены его характеристика холостого хода $E = f(n)$ и нагрузочные характеристики $U = f(n)$ при активной ($\cos \varphi = 1,0$) и активно-индуктивной ($\cos \varphi = 0,8$) нагрузке, при частоте $f = 50$ Гц.

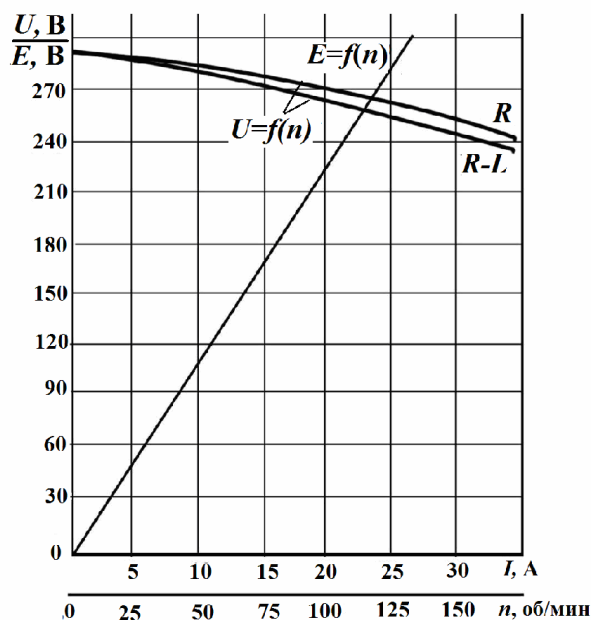


Рис. 2. Характеристика холостого хода $E = f(n)$ и нагрузочные характеристики $U = f(n)$ генератора при активной (R) и активно-индуктивной (R-L) нагрузках

Как видно из рисунка, полученные характеристики имеют типичный для синхронных генераторов вид, а их наклон к оси тока связан с падением напряжения на внутренних сопротивлениях генератора и реакцией якоря. В частности, при активной номинальной нагрузке изменение

напряжения не превышает 10-10,5 %, при смешанной нагрузке – 15 % от напряжения при холостом ходе.

Коэффициент искажения кривой напряжения под нагрузкой, как показали результаты осциллографирования, составляет $K_{ис} = 20,2$ %.

Результаты натурных испытаний подтвердили также и высокие технико-экономические показатели преобразования энергии.

Выводы

1. Разработан алгоритм оптимизационного расчета, дающий возможность, учитывая реальную картину распределения магнитных полей, кривые намагничивания электротехнических материалов, рабочие диаграммы магнитов, осуществлять оптимизационный расчет СГПМ по критерию максимума КПД при учете ограничения температуры перегрева обмоток и возможности расположения обмотки в пазах.

2. В основе оптимизационного расчета положено движение по градиенту. Использование градиентных методов оптимизации существенно сокращает продолжительность поиска оптимальных решений.

3. Проведен оптимизационный расчет и получены практические рекомендации по выбору основных варьируемых параметров СГПМ. У генератора, изготовленного в соответствии с предложенными рекомендациями, масса сокращается до 20 % по сравнению с аналогичными образцами.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Балагуров В.А. *Электрические генераторы с постоянными магнитами* / В.А. Балагуров, Ф.Ф. Галтеев. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.
2. Зарицкая Е.И. *Оптимизационный расчет тихоходного синхронного генератора на постоянных магнитах для безредукторных электрогенерирующих установок* / Е.И. Зарицкая, Л.Н. Канов, А.М. Олейников // *Проблемы техники: Научно-виробничий журнал*. – Одеса: ОНМУ, 2013. – Вып. 2. – С. 17-23.
3. Кривцов В.С. *Неисчерпаемая энергия. Кн.1. Ветроэлектрогенераторы: Учебник* / В.С. Кривцов, А.М. Олейников, А.И. Яковлев. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т ХАИ. – Севастополь: Севаст. нац. техн. ун-т, 2003. – 400 с.
4. Матвеев Ю.В. *Инженерная методика оптимизационного расчета тихоходного синхронного генератора с постоянными магнитами* / Ю.В. Матвеев, Л.Н. Канов, Е.И. Зарицкая // *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. – № 24. – 2009.

5. Олейников А.М. *Аппроксимация закона распределения магнитного поля в синхронном генераторе с постоянными магнитами.* / А.М. Олейников, О.П. Никитин, Е.И. Зарицкая, М.В. Прыймак // *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України: Зб. наук. праць.* – К.: ІЕД НАНУ. – 2012. – № 31. – С. 67-73.

Стаття надійшла до редакції 30.03.2015 р.

Рецензенти:

доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Суднові енергетичні установки та технічна експлуатація» Одеського національного морського університету **Р.А. Варбанець**

доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Технічна експлуатація флоту» Одеської національної морської академії **О.А. Онищенко**