

МЕТОДИКА КРИТЕРИАЛЬНОГО ВЫБОРА МАТЕРИАЛА МАГНИТОПРОВОДА СТАТОРА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

В.Е. Вавилов, Ф.Р. Исмагилов, И.Х. Хайруллин

(ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет»)

На основе анализа геометрических параметров магнитопровода электромеханических преобразователей энергии (ЭМПЭ) в статье представлена методика многокритериального выбора материала магнитопровода. Основными критериями в разработанной методике являются массогабаритные показатели ЭМПЭ и его коэффициент полезного действия, а также стоимость магнитопровода и минимальные отходы при штамповке. В результате анализа данных критериев получена многокритериальная целевая функция, которая при определении веса каждого критерия, входящего в неё, характеризует эффективность использования того или иного материала. Представлены численные расчёты по разработанной методике.

Ключевые слова: бесконтактный магнитоэлектрический генератор, магнито-мягкие сплавы, электротехническая сталь.

Материал магнитопровода статора во многом определяет эффективность электромеханических преобразователей энергии (ЭМПЭ), их габаритные размеры и стоимость. В последнее время в энергомашиностроении широкое распространение получили магнито-мягкие материалы, представляющие собой сплавы железа с кобальтом, например сплавы 27КХ, 49К2Ф и т. д. Данный класс материалов обладает высокой индукцией насыщения [1], что позволяет минимизировать массогабаритные показатели ЭМПЭ. В то же время он обладает значительной стоимостью, что, естественно, определяет требования по максимальной эффективности использования данных материалов, т. е. проектирования геометрии пакета статора ЭМПЭ таким образом, чтобы электромагнитные нагрузки в нём были максимальные, а материалоемкость, следовательно, и стоимость пакета, минимальной.

В работах отечественных и зарубежных авторов даются различные рекомендации по критериям и методам выбора материала магнитопровода статора. Так, например, в работах [2 – 4] рассмотрена методика выбора материала магнитопровода в быстроходных магнитоэлектрических генераторах (БМГ) исходя из величины потерь на гистерезис и вихревые токи, возникающих в нём в процессе эксплуатации. В работе [5] даются общие рекомендации выбора геометрических параметров магнитопровода электрических генераторов автономных объектов по критерию минимальных массогабаритных показателей, основанные на эмпирических данных. В то же время повышение требований к эффективности ЭМПЭ, при одновременной минимизации их стоимости и материалоемкости, а также необходимость обоснования заказчиком экономической рентабельности изделия требуют создания обобщённой методики много-

критериального выбора материала магнитопровода статора.

Данная задача в работе решается на примере бесконтактного магнитоэлектрического генератора (БМГ) с высококоэрцитивными постоянными магнитами (ВПМ). При этом в качестве критериев при выборе материала статора используются массогабаритные показатели БМГ, его КПД и стоимость магнитопровода статора [6, 7]. При этом изменение электромагнитных характеристик магнитопровода под действием температуры не принимается во внимание, так как БМГ проектируется таким образом, что температура статора не превышает 150 – 200 °С, а данные температуры не оказывают значительного влияния на характеристики электротехнических сталей и магнито-мягких сплавов.

При решении поставленной задачи считаются заданными: мощность, линейная токовая нагрузка, индукция в воздушном зазоре, частота вращения и геометрические параметры ротора БМГ, а также площадь обмотки статора с изоляцией. Для упрощения поставленной задачи, считается, что толщина пазовой изоляции также включена в площадь обмотки. Тогда полная масса БМГ определяется выражением [8]:

$$M_t = 561,348 \frac{P}{nB_0 A} \left\{ 1 + \frac{2,616 \cdot 10^3 An}{j \left(1 - 1,11 \frac{B_0}{B_z} \right) v_d} + \frac{1,134 B_0}{p B_j} \right\} (1 - k_p) + 42,84 \cdot 10^4 \frac{A v_d}{j p n^2},$$

где P – мощность БМГ; A – линейная токовая нагрузка; v_d – линейная скорость ротора БМГ; j – плотность тока в обмотках статора; p – число пар

полюсов ротора; B_δ – индукция в воздушном зазоре БМГ; B_z – индукция в зубцах статора БМГ; B_s – индукция в спинке статора БМГ; n – частота вращения ротора БМГ; k_p – коэффициент заполнения спинки ротора сталью.

Важно отметить, что по выражению (1) получается незначительно завышенная масса БМГ, так как данное выражение получено для конкретных значений коэффициента полюсного перекрытия, коэффициента заполнения паза и т. д. [8]. Но для решения задачи многокритериального выбора материала магнитопровода данное завышение не будет играть значительной роли.

Рассматривается прямоугольный паз и трапецеидальный зубец. Минимальная ширина зубца определяется известным выражением:

$$b_z = \frac{\pi D_{\text{ст}} B_\delta}{z k_c B_z}, \quad (2)$$

где $D_{\text{ст}}$ – диаметр расточки статора БМГ; z – число зубцов; k_c – коэффициент заполнения сталью статора БМГ.

Ширина паза в штампе при этом:

$$b_{\text{п}} = \frac{\pi D_{\text{ст}}}{z} \left(1 - \frac{B_\delta}{k_c B_z} \right) \quad (3)$$

и, соответственно, высота паза:

$$h_{\text{п}} = \frac{S_{\text{обн}}}{\frac{\pi D_{\text{ст}}}{z} \left(1 - \frac{B_\delta}{k_c B_z} \right) k_{\text{cu}}}, \quad (4)$$

где $S_{\text{обн}}$ – площадь, занимаемая обмоткой, с учётом пазовой изоляции и изоляции проводников.

С учётом выражений (2), (3), (4) вычисляется площадь, занимаемая зубцами статора, и, соответственно, их масса как функция магнитной индукции в зубцах статора:

$$S_z = \frac{\pi \left[\left[\frac{S_{\text{обн}}}{\frac{\pi D_{\text{ст}}}{z} \left(1 - \frac{B_\delta}{k_c B_z} \right) k_{\text{cu}}} \right]^2 + 2 \frac{S_{\text{обн}}}{\frac{\pi D_{\text{ст}}}{z} \left(1 - \frac{B_\delta}{k_c B_z} \right)} \right]}{4 - \frac{z S_{\text{обн}}}{k_{\text{cu}}}}, \quad (5)$$

$$M_z = \left[\left[\left[\frac{S_{\text{обн}}}{\frac{\pi D_{\text{ст}}}{z} \left(1 - \frac{B_\delta}{k_c B_z} \right) k_{\text{cu}}} \right]^2 + 2 \frac{S_{\text{обн}}}{\frac{\pi D_{\text{ст}}}{z} \left(1 - \frac{B_\delta}{k_c B_z} \right)} \right] \frac{z S_{\text{обн}}}{4 k_{\text{cu}}} \right] l \rho_{\text{ст}}, \quad (6)$$

где l – активная длина БМГ; $\rho_{\text{ст}}$ – плотность материала магнитопровода.

Масса спинки статора определяется аналогичным образом и представляется в виде:

$$M_s = \frac{\pi}{4} \left[2 h_s D_{\text{ст}} + 2 h_s \left(\frac{S_{\text{обн}}}{\frac{\pi D_{\text{ст}}}{z} \left(1 - \frac{B_\delta}{k_c B_z} \right)} \right) + h_s^2 \right] l \rho_{\text{ст}}, \quad (7)$$

с учётом того, что:

$$h_s = \frac{\Phi_\delta}{2 k_c l B_s}, \quad (8)$$

где Φ_δ – магнитный поток в воздушном зазоре БМГ.

Тогда, масса спинки статора может быть представлена как функция индукции в спинке статора:

$$M_s = \frac{\pi}{4} \left[\frac{\Phi_\delta}{k_c l B_s} D_{\text{ст}} + \frac{\Phi_\delta}{k_c l B_s} \left(\frac{S_{\text{обн}}}{\frac{\pi D_{\text{ст}}}{z} \left(1 - \frac{B_\delta}{k_c B_z} \right)} \right) + \frac{\Phi_\delta}{4 k_c^2 l^2 B_s^2} \right] l \rho_{\text{ст}}. \quad (9)$$

С учётом выражений (6), (9) потери в спинке статора и зубцах могут быть определены в виде [9]:

$$P_s = \frac{\pi k_s B_s^2 P_{1/400}}{4} \left[\frac{\Phi_\delta}{k_c l B_s} D_{\text{ст}} + \frac{\Phi_\delta}{k_c l B_s} \left(\frac{S_{\text{обн}}}{\frac{\pi D_{\text{ст}}}{z} \left(1 - \frac{B_\delta}{k_c B_z} \right)} \right) + \frac{\Phi_\delta}{4 k_c^2 l^2 B_s^2} \right] \times \rho_{\text{ст}} \left(\frac{f}{400} \right)^{1.5};$$

$$P_z = \frac{\pi k_z B_z^2 P_{1/400}}{4} l \rho_{\text{ст}} \left(\frac{f}{400} \right)^{1.5} \times$$

$$\left[\left[\left[\frac{S_{\text{обн}}}{\frac{\pi D_{\text{ст}}}{z} \left(1 - \frac{B_\delta}{k_c B_z} \right) k_{\text{cu}}} \right]^2 + 2 \frac{S_{\text{обн}}}{\frac{\pi D_{\text{ст}}}{z} \left(1 - \frac{B_\delta}{k_c B_z} \right)} \right] \frac{z S_{\text{обн}}}{4 k_{\text{cu}}} \right], \quad (11)$$

где $P_{1/400}$ – удельные потери в магнитопроводе БМГ при частоте 400 Гц; f – частота тока БМГ.

Полный КПД БМГ, с учётом выражений (10), (11) может быть представлен как функция магнитной индукции в зубцах и спинке статора:

$$\eta = \frac{P \cos \varphi}{P \cos \varphi + (P_s + P_z + P_{\text{доп}} + P_m + P_{\text{аз}})}. \quad (12)$$

Помимо массогабаритных показателей и КПД при определении оптимального материала магнитопровода статора необходимо учитывать его стоимость, поэтому в разрабатываемую методику необходимо ввести показатель характеризующий стоимость пакета статора в зависимости от электромагнитных характеристик материала. При этом допускается, что пакет статора выполняется из ленты электротехнической стали или ленты магнитомягкого сплава, тогда количество листов по ширине ленты стали определяется, с учётом (4), (7), в виде:

$$N_M = \left[\frac{h_{\text{л}}}{\left(D_{\text{ст}} + \frac{\Phi_{\delta}}{k_c B_s} + 2 \frac{S_{\text{обш}}}{\frac{\pi D_{\text{ст}}}{z} \left(1 - \frac{B_{\delta}}{k_c B_z} \right)} + 2 \Delta_{\text{сбш}} \right)} \right], \quad (13)$$

где $h_{\text{л}}$ – ширина ленты электротехнической стали (указана в ГОСТ или ТУ); $\Delta_{\text{сбш}}$ – технологический припуск на штамповку по ширине ленты.

Если количество листов в пакете магнитопровода N_i определяется известным выражением, то длина ленты электротехнической стали, необходимой для изготовления пакета статора, может быть представлена в виде:

$$l_{\text{л}} = \frac{N_i}{N_M} \left(D_{\text{ст}} + \frac{\Phi_{\delta}}{k_c B_s} + 2 \frac{S_{\text{обш}}}{\frac{\pi D_{\text{ст}}}{z} \left(1 - \frac{B_{\delta}}{k_c B_z} \right)} + \Delta_{\text{сбд}} \right), \quad (14)$$

где $\Delta_{\text{сбд}}$ – технологический припуск на штамповку по длине ленты.

Полная масса ленты, необходимой для изготовления магнитопровода, определяется с учётом (13), (14) в виде:

$$M_{\text{л}} = \frac{N_i}{N_M} \left(D_{\text{ст}} + \frac{\Phi_{\delta}}{k_c B_s} + 2 \frac{S_{\text{обш}}}{\frac{\pi D_{\text{ст}}}{z} \left(1 - \frac{B_{\delta}}{k_c B_z} \right)} + \Delta_{\text{сбд}} \right) h_{\text{л}} \Delta \rho_{\text{ст}}, \quad (15)$$

где Δ – толщина листа.

Стоимость изготовления магнитопровода статора БМГ с учётом (15):

$$\Pi_{\text{л}} = k_{\text{тех}} \frac{N_i}{N_M} \left(D_{\text{ст}} + \frac{\Phi_{\delta}}{k_c B_s} + 2 \frac{S_{\text{обш}}}{\frac{\pi D_{\text{ст}}}{z} \left(1 - \frac{B_{\delta}}{k_c B_z} \right)} + \Delta_{\text{сбд}} \right) \times h_{\text{л}} \Delta \rho_{\text{ст}} \Pi_{\text{кг}}, \quad (16)$$

где $k_{\text{тех}}$ – коэффициент, учитывающий технологическую сложность сборки пакета и обработки листов (так, например, для тонких листов $k_{\text{тех}}$ больше, чем для листов значительной толщины); $\Pi_{\text{кг}}$ – цена за 1 кг материала магнитопровода.

При минимальной стоимости в процессе штамповки отходы ферромагнитного материала должны быть также минимальны, т. е.:

$$M_{\text{от}} = M_{\text{л}} - M_z - M_s. \quad (17)$$

С учётом выражений (7), (9) и (15) масса отходов также представляется как функция индукции в спинке статора и зубцах.

Введение в предложенную методику критерия отходов при изготовлении магнитопровода позволяет использовать данную методику для различных конструкций магнитопроводов с пониженной материалоемкостью [10].

Кроме электромагнитных нагрузок магнитопровод статора испытывает механические нагрузки, обусловленные электромагнитными силами, в частности это радиальные силы, действующие на дно паза, силы одностороннего магнитного тяжения зубцов статора и тангенциальные силы, действующие на обмотку в пазу. Так как механическая прочность магнитопровода статора должна обеспечиваться как при номинальных режимах работы БМГ, так и при аварийных, то имеет смысл оценивать прочность магнитопровода именно при аварийных режимах работы БМГ.

Предел прочности магнитопровода спинки статора в общем случае определяется выражением:

$$\sigma = \frac{F}{S}, \quad (17)$$

где σ – предел текучести материала статора; F – сила, действующая на элемент поверхности магнитопровода статора; S – площадь.

Тогда толщина спинки статора, исходя из соображений прочности, определяется в виде:

$$h_s = \frac{\mu_0 m^2 I_{кз}^2}{b_{п} \sigma}. \quad (18)$$

С учётом (4), (8) и (18):

$$B_s \leq \frac{\Phi_{\delta} \pi D_{ст} \left(1 - \frac{B_{\delta}}{k_c B_z}\right) \sigma}{2k_c l z \mu_0 m^2 I_{кз}^2}. \quad (19)$$

Механическая прочность зубца статора, определяется выражением:

$$\sigma = \frac{\mu_0 m I_{кз} l H_z}{h_{п} b_z}. \quad (20)$$

Тогда с учётом (3), (4) минимально допустимый предел прочности на текучесть для зубца статора:

$$\sigma_{\min z} = \frac{\mu_0 m I_{кз} l (k_c B_z H_z - B_{\delta} H_z)}{S_{\text{оби}} B_{\delta}}. \quad (21)$$

С учётом вышепредставленных рассуждений может быть сформулирована задача многомерного, многокритериального выбора материала статора:

$$\left\{ \begin{array}{l} M_{г}(B_z, B_s) \rightarrow \min \\ \eta(B_z, B_s) \rightarrow \max \\ \Pi_{п}(B_z, B_s) \rightarrow \min \\ M_{от}(B_z, B_s) \rightarrow \min \\ 1,4 < B_z < B_{зН} \\ 1,4 < B_s \leq \frac{\Phi_{\delta} \pi D_{ст} \left(1 - \frac{B_{\delta}}{k_c B_z}\right) \sigma}{2k_c l z \mu_0 m^2 I_{кз}^2} \end{array} \right. \quad (22)$$

Таким образом, задаваясь максимально допустимыми значениями магнитной индукции для

зубцов и спинки статора для конкретного материала магнитопровода, появляется возможность определить значение каждого критерия, входящего в (22), произвести сравнительный многокритериальный анализ эффективности применения того или иного материала и сделать по результатам данного анализа оптимальный выбор материала магнитопровода.

Для уменьшения количества сравниваемых критериев выражение (22) может быть сведено к задаче с одним критерием, посредством определения веса каждой функции, входящей в (22):

$$f(B_z, B_s) = -\lambda_1 M_{г}(B_z, B_s) + \lambda_2(B_z, B_s) - \lambda_3 \Pi_{п}(B_z, B_s) - \lambda_4 M_{от}(B_z, B_s) \rightarrow \max, \quad (23)$$

где $\lambda_1 \dots \lambda_4$ – соответственно, веса каждого критерия в общей функции эффективности использования того или иного материала магнитопровода статора.

При переходе от задачи многокритериального сравнения к функции одной переменной, характеризующей эффективность применения того или иного материала, необходимо от размерных величин, входящих в (22), перейти к относительным единицам:

$$y^* = \frac{Y(B_z, B_s)}{Y_m(B_z, B_s)}, \quad (24)$$

где y^* – критерий в относительных единицах; $Y(B_z, B_s)$ – критерий в размерных единицах; $Y_m(B_z, B_s)$ – базовая величина в размерных единицах.

Так как определяется эффективность использования заведомо известной марки электротехнической стали или магнито-мягкого сплава, то в качестве базовой величины принимается значение параметров, входящих в (22), при индукции насыщения для данной стали или магнито-мягкого сплава, значение которых обычно указано в ГОСТ или технических справочниках:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}(B_z, B_s) = & \lambda_1 \frac{M_{г}(B_z, B_s)}{M_{г}(B_{зН}, B_{сН})} - \lambda_2 \eta(B_z, B_s) + \\ & + \lambda_3 \frac{\Pi_{п}(B_z, B_s)}{\Pi_{п}(B_{зН}, B_{сН})} + \lambda_4 \frac{M_{от}(B_z, B_s)}{\Pi_{п}(B_{зН}, B_{сН})} \rightarrow \min, \end{aligned} \quad (25)$$

где $\mathcal{E}(B_z, B_s)$ – эффективность использования материала статора.

Тогда с учётом (25) может быть сформулировано общее условие выбора материала магнитопро-

вода статора: из двух материалов эффективнее использовать тот, у которого $\Xi(B_z, B_s)$ меньше при одинаковых $\lambda_1 \dots \lambda_4$.

Для полной оценки эффективности использования того или иного материала статора необходимо оценить насыщения магнитной системы БМГ. Для этого, используя известные соотношения, определяются магнитодвижущие силы различных участков магнитной цепи БМГ исходя из напряжённостей магнитного поля, соответствующих принятым значениям магнитной индукции в зубцах и спинке статора. При этом, при определении напряжённостей, целесообразно воспользоваться не кривыми намагничивания, а аппроксимирующими их функциями, так как это позволит реализовать предложенную методику критериального выбора материала магнитопровода статора в виде специализированного программного приложения и минимизировать трудозатраты, связанные с проектированием БМГ. В частности, возможно, использовать методику универсальной аппроксимации, предложенную в [11]. При этом напряжённость магнитного поля в данной методике определяется в виде функции магнитной проницаемости материала магнитопровода:

$$\mu^*(H^*) = \left[\frac{\mu_{\max}}{\mu_{\max} - 1} + \frac{(|H^* - 1|^b)}{1 - \mu_{\min}^* - 0,17H^{*(1-1,5H^*)} + \frac{B_H H^{*(b-1)}}{B_{\max} k(H^*)} - 1} \right] + \frac{1}{\mu_{\max}} \quad (26)$$

где $\mu^*(H^*) = \frac{\mu_r(H)}{\mu_0 \mu_{\max}}$ – нормированная магнитная проницаемость материала магнитопровода в относительных единицах; $\mu_r(H)$ – магнитная проницаемость электротехнической стали или магнитомягкого сплава; $H^* = \frac{H}{H_{\max}}$ – нормированная ко-

эрцитивная сила материала магнитопровода в относительных единицах; H_{\max} – коэрцитивная сила материала магнитопровода статора при максимальной магнитной проницаемости; H – действующее значение коэрцитивной силы в материале магнитопровода; μ_{\max} – максимальная относительная магнитная проницаемость; $\mu_{\min}^* = \frac{\mu_{\min}}{\mu_{\max} \mu_0}$ – нормированная начальная магнитная проницаемость; μ_{\min} – начальная магнитная проницаемость; b – безразмерный коэффициент, обусловленный технологическими особенностями процесса прокатки; B_H – индукция насыщения для рассматриваемого материала; B_{\max} – магнитная индукция при максимальной магнитной проницаемости материала; $k(H^*) = \left(1 + 400e^{-9(H^*)^2}\right) \left[1 + \frac{1,2}{2 + (H^*)^{0,4}}\right]^{0,9}$ – поправочная функция.

В качестве численного примера рассматривается критериальный сравнительный анализ электротехнической стали 2421 (ГОСТ 21427.2 – 83) и магнитомягкого сплава 49К2Ф (ГОСТ 10160 – 75) для бесконтактного магнитоэлектрического генератора мощностью 60 кВт, частотой вращения ротора 12 000 об/мин, диаметром расточки статора 150 мм, линейной токовой нагрузкой 40 000 А/м, плотностью тока в обмотках 18 А/мм², активной длиной 140 мм. При этом рассматривается два варианта: БМГ применяется в децентрализованных установках автономной энергетики и наиболее важными критериями, определяющими его эффективность, являются минимальная цена и максимальный КПД; БМГ применяется в системе электроснабжения летательного аппарата, при этом наиболее важными критериями, определяющими его эффективность, являются минимальная масса и максимальный КПД. При численных расчётах предполагалось, что лента обоих материалов имеет одинаковые размеры, тогда возможно принять $\lambda_4 = 0$.

Результаты критериального сравнительного анализа представлены таблице.

Результаты критериального сравнения электротехнической стали 2421 (ГОСТ 21427.2 – 83) и магнито-мягкого сплава 49К2Ф (ГОСТ 10160 – 75)

Материал	Масса, кг	КПД, %	Цена, тыс. руб.	Эффективность использования по формуле (25)
Авиационный БМГ ($\lambda_1 = 0,4; \lambda_2 = 0,4; \lambda_3 = 0,2; \lambda_4 = 0$)				
49К2Ф	24,41	95	247	0,231
2421	24,9	97	135	0,23
БМГ в децентрализованной энергетике ($\lambda_1 = 0,2; \lambda_2 = 0,4; \lambda_3 = 0,4; \lambda_4 = 0$)				
49К2Ф	24,41	95	247	0,237
2421	24,9	97	135	0,232

Таким образом, из таблицы видно, что в обоих рассматриваемых вариантах наиболее оптимальным будет являться, для выбранных весовых коэффициентов (25), применение электротехнической стали 2421.

Выводы

1. Разработана обобщённая методика многокритериального выбора материала магнитопровода статора, позволяющая, исходя из энергетических параметров ЭМПЭ, а также требований по его массогабаритным показателям и стоимости, выбирать наиболее оптимальный материал магнитопровода статора. Произведены численные исследования по разработанной методике, в результате которых установлено, что для авиационного БМГ мощностью 60 кВт с частотой вращения ротора 12 000 об/мин и диаметром рашотки статора 150 мм более эффективно применять электротехническую сталь 2421, нежели магнито-мягкие сплавы 27КХ и 49КФ2.

2. Разработана безразмерная функция, характеризующая эффективность материала магнитопровода и сформулировано общее условие оптимального выбора из двух и более материалов статора, заключающееся в том, что из двух материалов эффективнее использовать тот, у которого функция, характеризующая эффективность, меньше, при одинаковых весах каждого критерия.

Полученные результаты могут быть использованы на практике при проектировании ЭМПЭ в целом, и ЭМПЭ с высококоэрцитивными постоянными магнитами в частности.

Литература

1. High-Speed electrical machines: Technologies, trends, and developments / D. Gerada, A. Mebarki, N. L. Brown [et al.] //

Industrial electronics, IEEE Transactions on magnetics. – V. 61. – № 6. – P. 2946 – 2959.

2. An evaluation of alternative stator lamination materials for a high-speed, 1.5 MW, permanent magnet generator / J. H. Paulides Johannes, W. Jewell Geraint, D. Howe // IEEE Transactions on magnetics. – V. 40. – № 4. – P. 2041 – 2043.

3. Losses in high speed permanent magnet machines used in microturbine applications / Co Huynh, Liping Zheng, Dipjyoti Acharya // Journal of engineering for gas turbines and power. – V. 131.

4. Modeling and design of 100 Krpm and 10 KW-class spindle motor for 5-axes blade grinding machine / Duo Chen, Ming Feng // Electrical machines and systems (ICEMS). – International Conference. – 2011. – P. 1 – 4.

5. Сугробов А. М., Русаков А. М. Проектирование электрических машин автономных объектов / А. М. Сугробов, А. М. Русаков. – М. : Изд. дом МЭИ, 2012. – 304 с.

6. Математическая модель переходных тепловых процессов в бесконтактной магнитоэлектрической машине / Ф. Р. Исмагилов, И. Х. Хайруллин, В. Е. Вавилов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2013. – № 3. – Т. 9. – С. 8 – 14.

7. Определение коэффициента полюсного перекрытия быстроходных магнитоэлектрических машин с высококоэрцитивными цилиндрическими магнитами / Ф. Р. Исмагилов, И. Х. Хайруллин, В. Е. Вавилов // Электричество. – 2013. – № 11. – С. 51 – 53.

8. Балагуров В. А. Электрические генераторы с постоянными магнитами / В. А. Балагуров. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 279 с.

9. Ледовский А. Н. Электрические машины с высококоэрцитивными постоянными магнитами / А. Н. Ледовский. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 169 с.

10. Яковлев А. И. Электрические машины с уменьшенной материалоемкостью / А. И. Яковлев. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 235 с.

11. Универсальная аппроксимация кривых намагничивания электротехнических сталей / А. В. Попов, А. В. Красножон // Электротехника і Електромеханіка. – 2006. – № 1. – С. 66 – 70.

Поступила в редакцию 25.04.2014

Вячеслав Евгеньевич Вавилов, канд. техн. наук, старший преподаватель, т. 8 (927) 346-53-05.

Флюр Рашитович Исмагилов, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой.

Ирек Ханифович Хайруллин, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры.

E-mail: s2_88@mail.ru. Т. (347) 273-77-87.