

* * *

Электричество, 2015, № 10, с. 32–37.

Алгоритм определения размеров редкоземельных постоянных магнитов применительно к системам возбуждения синхронных электрических генераторов

СУГРОБОВ А.М., РУСАКОВ А.М., ОКУНЕЕВА Н.А., КАЗИМИРОВ Е.О.

Составлен алгоритм определения размеров постоянных магнитов, обеспечивающих реализацию электромагнитных нагрузок, принятых на стадии определения главных размеров синхронных генераторов. Алгоритм является более совершенным по сравнению с алгоритмами, на основе которых построены современные методики расчета синхронных электрических генераторов с возбуждением от постоянных магнитов. Для определения размеров магнитов получены их зависимости от электромагнитных нагрузок, принятых при определении главных размеров проектируемых генераторов, а также от параметров, характеризующих геометрию их полюсной системы и др. Приведен пример расчёта размеров постоянных магнитов конкретного генератора. Отличительной особенностью статьи является использование в ней взаимосвязей между электромагнитными параметрами электрических машин, которые не использовались при их проектировании ранее либо применялись в более сложном и неудобном для проектирования виде. Статью следует рассматривать как попытку создания унифицированной методики проектирования электрических машин с различными системами возбуждения.

Ключевые слова: синхронный генератор, постоянный магнит, система возбуждения, электромагнитные нагрузки, индуктивные сопротивления обмотки, диаграмма Blondеля

При выводе расчётных соотношений для определения главных размеров синхронных электрических машин (формулы Арнольда) не привлекаются данные об устройстве их индукторов, а также о магнитных и электрических характеристиках элементов системы возбуждения (см., например, [1, 2]). Эти соотношения в одинаковой степени считаются справедливыми для машин с электромагнитным возбуждением, возбуждением от постоянных магнитов и с комбинированным возбуждением. Это означает, что электрические машины с различ-

ными системами возбуждения, спроектированные на одни и те же значения линейной нагрузки A , индукции в воздушном зазоре B_d и прочие равные условия (активные P или реактивные S мощности, частоту вращения n , одинаковую геометрию полюсной системы и другие параметры), должны иметь одинаковые размеры расточки якоря, а после их изготовления — одинаковые значения электромагнитной мощности P_Σ или S_Σ .

В действительности такой результат проектирования возможен, но только в случае, если в про-

цессе выполнения электромагнитных расчётов независимо от способа создания поля возбуждения в проектируемой машине максимально использованы средства, обеспечивающие реализацию выбранных на стадии определения её главных размеров значений линейной нагрузки A и магнитной индукции в воздушном зазоре B_d . В машинах с электромагнитным возбуждением реализация электромагнитных нагрузок не вызывает серьёзных затруднений. Средством их реализации является МДС обмотки возбуждения $F_{о.в}$, которая определяется по результатам расчёта магнитной цепи в номинальном режиме при выбранных значениях индукции в воздушном зазоре $B_{др}$, тока в обмотке якоря, соответствующем выбранному значению линейной нагрузки A_p , и заданном коэффициенте мощности нагрузки $\cos \varphi$.

Постоянные магниты в отличие от электромагнитов являются автономными источниками магнитной энергии. Их магнитные свойства формируются при воздействии на них сначала намагничивающего магнитного поля, а затем, после извлечения из намагничивающей установки, — размагничивающих полей, обеспечивающих, в конечном счёте, стабильность и однозначность их магнитных характеристик.

Принципиальное отличие магнитных характеристик электромагнитов от характеристик постоянных магнитов в том, что их положение в координатных осях $[F_M; F_M]$ и относительно характеристик магнитной цепи за пределами рашотки индуктора можно менять, изменяя ток в обмотке возбуждения.

Изменить же ориентацию магнитных характеристик постоянных магнитов, а для редкоземельных магнитов — это практически линейные зависимости магнитного потока F_M в их нейтральных сечениях от МДС F_M на торцах (рис. 1), относительно характеристик внешней магнитной цепи (поднять, опустить или изменить угол наклона к оси МДС) и добиться тем самым ее прохождения через точку N_p , соответствующую номинальному режиму работы проектируемой машины (выбранным A_p и $B_{др}$), можно только путём изменения размеров постоянного магнита. По этой причине использование при проектировании машин с постоянными магнитами алгоритма определения главных размеров, традиционно применяемого для машин с электромагнитным возбуждением, добиться реализации выбранных значений электромагнитных нагрузок A_p и $B_{др}$ можно только путём соответствующего выбора размеров постоянных магнитов в пределах фиксированного объёма рашотки индуктора и с учётом магнитных свойств сплава, из которых их предполагается изготовить.

Естественно, что при этом необходимо учитывать особенности построения магнитной системы индуктора.

При проектировании электрических машин с постоянными магнитами, основанном на введении в число исходных данных линейной нагрузки и индукции в воздушном зазоре, размеры постоянных магнитов определяются на заключительном этапе проектного расчёта. Перед этим, как и при определении размеров электромагнитов электрических машин с электромагнитным возбуждением, можно считать известными (определёнными) все основные размеры якоря, включая диаметр D и длину l_i рашотки, воздушный зазор d , число полюсов p , размеры пазов и зубцов якоря, число витков в фазе обмотки w_ϕ и распределение её секций по пазам, активное R_ϕ и индуктивное сопротивления рассеяния обмотки x_s , а также все те параметры и коэффициенты, значения которых были выбраны или рассчитаны на этапах расчёта, предшествующих определению размеров индуктора. Известными можно считать: расчётный и конструктивный коэффициенты полюсного перекрытия a_p и a_i ; число полюсов p ; число пазов на полюс и фазу q ; коэффициенты $d^* = d/t$ и $h_{п.н}^* = h_{п.н}/t$ (d — воздушный зазор; $h_{п.н}$ — высота полюсных наконечников; $t = pD/2p$ — полюсное деление), характеризующие геометрию полюсной системы; коэффициент воздушного зазора K_d , коэффициент, равный отношению электромагнитной мощности P_Σ к мощности нагрузки k_E ; обмоточный коэффициент k_{o1} ; коэффициент приведения МДС якоря к МДС постоянного магнита k_{ad} ; коэффициенты пазового l_π , лобового l_Δ и дифференциального l_Δ рассеяния и их сумма $e l$ и другие параметры и коэффициенты.

Что касается электромагнитных нагрузок A и B_d , то выбирать их расчётные значения (A_p и $B_{др}$) при проектировании машин с постоянными магнитами необходимо с учётом областей их применения по рекомендациям, составленным применительно к решению тех задач, которые поставлены перед разработчиком конкретной электрической машины, и к той системе охлаждения, которую в ней предполагается использовать.

Очевиден факт, что только при известных значениях перечисленных выше параметров можно определить размеры постоянных магнитов, обеспечивающие реализацию в проектируемых машинах выбранных условно независимых переменных, включая электромагнитные нагрузки. Применение других алгоритмов, в том числе и предполагающего определение объёма и размеров магнитов на начальной стадии проектирования машины [3] без

привлечения перечисленных выше параметров, позволяет получить лишь приближённые значения объёма и высоты магнитов, как правило, значительно отличающиеся от требуемых для обеспечения заданной мощности.

В соответствии с предлагаемым алгоритмом перед определением размеров постоянных магнитов выбирается сплав для их изготовления. Он должен обладать высокими магнитными свойствами, быть доступным по стоимости. Изготовленные из него постоянные магниты должны органично вписываться в конструкцию индуктора, не усложняя её, и максимально заполнять отведённый под их размещение объём. Размеры же самих постоянных магнитов должны быть такими, чтобы зависимость магнитного потока F_M от МДС F_M (спинка размагничивания постоянного магнита на рис. 1) прошла через точку N_p номинального режима, соответствующую выбранным значениям A_p и B_{dp} . Условия, при которых эти требования выполняются, можно сформулировать, решив уравнение (рис. 1):

$$F_{M,p} = (F_{CB} - e F_{M.ц.р}) \operatorname{tg} b = (2h_M H_{CB} - e F_{M.ц.р}) m_M \frac{S_M}{2h_M}, \quad (1)$$

где $F_{M,p} = B_{M,p} S_M$ – магнитный поток в нейтральном сечении постоянного магнита в расчётном режиме; h_M, S_M – высота и площадь поперечного сечения магнита; $m_M = \frac{DB_M}{DH_M} \gg \frac{B_r}{H_{CB}}$ – магнитная

проницаемость магнита; B_r, H_{CB} – остаточная индукция и коэрцитивная сила по индукции сплава магнита; $e F_{M.ц.р}$ – суммарная МДС магнитной цепи, противодействующая вхождению в неё магнитного потока постоянного магнита. После представления этой МДС в аналитическом виде через падение магнитного потенциала в воздушном зазоре и стали статора $e F_{Fe,d}$ и МДС якоря на пару полюсов, приведённой к МДС постоянного магнита F_{ad} , запишем второе уравнение:

$$e F_{M.ц.р} = e F_{Fe,d} + F_{ad}, \quad (2)$$

где

$$e F_{Fe,d} = 2 \frac{B_{ddp} dk_d k_{mp}}{m_\theta}; \quad (3)$$

$$F_{adp} = \frac{2\sqrt{2} m l w_\phi}{pp} k_{o1} k_{ad} \sin y_p = \frac{2\sqrt{2}}{p} A_p t k_{o1} k_{ad} \sin y_p. \quad (4)$$

В (3) и (4) $B_{ddp}, k_{ad}, k_{mp}, m, p, t, \sin y_p$ – соответственно, магнитная индукция в воздушном зазоре, обусловленная совместным действием по-

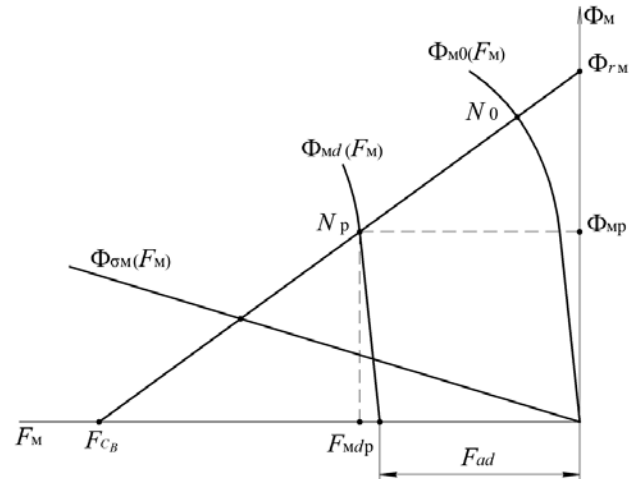


Рис. 1. Характеристики магнита: $\Phi_{M0}(F_M)$ – характеристика магнитной цепи в режиме холостого хода; $\Phi_{dM}(F_M)$ – зависимость магнитного потока рассеяния от МДС магнита; $\Phi_{Md}(F_M)$ – зависимость магнитного потока в продольной оси генератора от МДС магнита

стоянного магнита и приведённой к нему МДС якоря F_{adp} при совпадении осевых линий постоянного магнита и продольной составляющей МДС якоря; коэффициент, учитывающий насыщение магнитопровода от продольной составляющей магнитного потока; число фаз и пар полюсов генератора; полюсное деление и синус угла между векторами тока I и ЭДС холостого хода E_0 в расчётном режиме;

$$\sin y = \frac{\operatorname{tg} y}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 y}}. \quad (5)$$

Если принять $\cos j \gg 1$ (проектируемый генератор – вентильный) и считать сопротивление нагрузки R_H в расчётном режиме значительно больше активного сопротивления обмотки якоря, то (см. рис. 2)

$$\operatorname{tg} y = \frac{x_{aq} + x_s}{R_H} = \frac{x_q}{\sqrt{z_{\check{H}}^2 - x_s^2}} = \frac{x_q^*}{\sqrt{1 - x_s^{*2}}}, \quad (6)$$

где x_{aq} – индуктивное сопротивление по поперечной оси генератора; $z_{\check{H}} = \sqrt{R^2 + x_s^2}$ – полное сопротивление электрической цепи фазы; $x_{aq}^* = x_{aq} / z_{\check{H}}$ и $x_s^* = x_s / z_{\check{H}}$ – сопротивления x_s и x_{aq} , выраженные в долях полного электрического сопротивления фазы $z_{\check{H}}$.

Выраженные в относительных единицах зависимости индуктивных сопротивлений x_{aq}^* и x_s^* от электромагнитных нагрузок, параметров, характеризующих геометрию полюсной системы проектируемых машин, и других параметров имеют вид:

$$x_{aq}^* = \frac{x_{aq}}{z_{\check{H}}} = \frac{4 m_\theta m f (w_\phi k_{o1})^2 t l_i k_q}{pp z_{\check{H}} dk_d} =$$

$$= \frac{m_0}{\rho} \frac{k_{o1} k_q}{a_i d^* k_d k_{\phi E}} A_p^*; \quad (7)$$

$$x_s^* = \frac{4 \rho m_0 f(w_{\phi i}^2)}{\rho q z \tilde{Y}} e l = \rho m_0 \frac{e l}{a_i k_{\phi E} k_{o1} m q} A_p^*,$$

где $A_p^* = \frac{A_p}{B_{dp}}$; k_q – коэффициент формы поля по поперечной оси; коэффициент приведения МДС якоря к МДС возбуждения

$$k_{ad} = k_d / k_f; \quad (8)$$

k_d – коэффициент формы поля по продольной оси; k_f – коэффициент формы поля возбуждения (значения k_d и k_q применительно к генераторам с постоянными магнитами приведены в [4]).

Результатом совместного решения (1) и (2) относительно высоты постоянных магнитов h_M , необходимой для реализации электромагнитных нагрузок A_p и B_{dp} , выбранных на стадии определения главных размеров проектируемых генераторов, является выражение

$$h_M = \frac{B_{dp} B_{ddp}^* k_{mtp} m_M^* d^* k_d j(A_p, B_{dp})}{(B_r - B_{Mdp})} t, \quad (9)$$

где

$$j(A_p, B_{dp}) = 1 + \frac{\sqrt{2}}{\rho} A_p^* \frac{k_{o1} k_{ad} m_0}{B_{ddp}^* k_{mtp} d^* k_d} \sin \gamma_p; \quad (10)$$

$$B_{ddp}^* = \frac{B_{ddp}}{B_{dp}}. \quad (11)$$

Зависимость между B_{ddp} и B_{dp} определяется из диаграммы Blondеля (рис. 2):

$$\frac{E_{ddp}}{E_{dp}} = \frac{B_{ddp}}{B_{dp}} = B_{ddp}^* = \frac{1}{k_f} \sqrt{1 - x_{aq}^* \cos^2 \gamma}, \quad (12)$$

при этом принимается во внимание то обстоятельство, что B_{ddp} является максимальным значением на графике, повторяющем форму кривой распределения в воздушном зазоре магнитной индукции от постоянного магнита, и связано с амплитудой первой гармонической магнитной индукции по продольной оси соотношением

$$B_{ddp1} = B_{ddp} k_f. \quad (13)$$

Соотношение между магнитной индукцией в нейтральном сечении постоянного магнита $B_{Mр}$ в (9) и индукцией B_{ddp} зависит от конструкции индуктора и геометрии его полюсной системы.

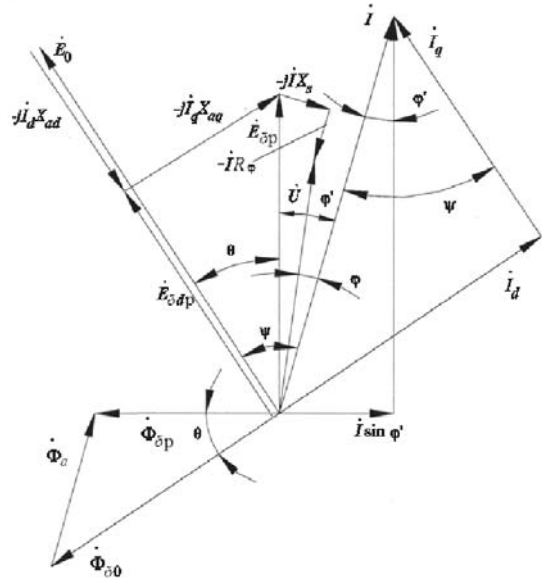


Рис. 2. Диаграмма Blondеля

Для индукторов звездообразной формы без полюсных наконечников

$$B_{Mdp} = B_{ddp} s_{M,p}; \quad (14)$$

для индукторов с полюсными наконечниками

$$B_{Mdp} = B_{ddp} s_{M,p} a_M, \quad (15)$$

где $a_M = a_i t / b_M$; b_M – ширина магнита; в индукторах коллекторного типа с тангенциальным намагничиванием

$$a_M = a_i t / b_M;$$

b_M – длина магнита в радиальном направлении.

Точность определения высоты постоянных магнитов h_M зависит в основном от соответствия принятых при её определении коэффициентов их значениям в выполненной машине. В значительной степени это замечание относится к коэффициенту рассеяния магнитного потока в расчётном режиме $s_{M,p} = F_{M,p} / F_{ddp}$ (F_{ddp} – продольная составляющая результирующего магнитного потока в воздушном зазоре в расчётном режиме работы генератора), зависящему от геометрии и размеров магнитной системы индуктора, а также от характера и силы воздействия на постоянные магниты МДС якоря. Определить точные значения коэффициента можно только при полностью сформированной магнитной системе индуктора. На стадии определения размеров постоянных магнитов поля рассеяния учитываются при выборе предварительных значений коэффициента рассеяния. При этом необходимо принимать во внимание то обстоятельство, что значения этого коэффициента однозначно связаны с положением рабочей точки на характеристике постоянного магнита (рис. 1), построенной в координатах $[F_M; F_M]$ и являющейся отобра-

жением в этих координатах прямой $(B_M; H_M)$. Наименьшее значение коэффициента рассеяния s_{M0} – в точке N_0 , соответствующей работе машины в режиме холостого хода, а наибольшее $s_{M,K}$ – в режиме максимального размагничивания. С достаточной для предварительных расчётов степенью достоверности значение коэффициента рассеяния магнитного потока постоянных магнитов на этапе определения их размеров можно определить только применительно к режиму холостого хода (в точке N_0 на рис. 1). Значения его в расчётном режиме связаны с s_{M0} зависимостью

$$s_{Mi} = \frac{3}{i} \frac{H_{M,p} B_{M0} s_{M0} - 1}{B_{M,p} H_{M0} s_{M0}} \frac{1}{\psi} = 1 + (s_{M0} - 1) j(A_p; B_{dp}) \frac{k_{mdp}}{k_{m0}} \quad (16)$$

Значения s_{M0} для электрических машин с различными по конструкции роторами и геометрией полюсной системы можно найти, например, в [3].

Пример. Определение размеров постоянных магнитов генератора мощностью 40 кВт. Исходные данные для расчета размеров постоянных магнитов, полученные при определении размеров и обмоточных данных статора по традиционным методикам расчёта синхронных машин:

диаметр и длина расточки статора $D = 17,5$ см, $l_i = 8,4$ см;

напряжение $U = 120 / 208$ В;

частота вращения $n = 8000$ об/мин;

число пар полюсов и полюсное деление $p = 6$, $t = 9,163$ см;

число фаз и число пазов на полюс и фазу $m = 3$, $q = 4,5$;

размер и коэффициент воздушного зазора $d = 0,9$ мм, $k_d = 1,125$;

электромагнитные нагрузки: $A_p = 327$ А/м; $B_d = 0,6$ Тл; $A_p^* = 54500$ А/Вб;

коэффициенты: $k_{o1} = 0,826$; $k_E = 1,095$; $a_i = 0,73$; $a_m = 1,0$; $d = 0,9$ мм; $d^* = 0,01$; $e_l = 3,58$; $k_{md} = 1,17$; $k_{m0} = 1,3$; $s_{M0} = 1,15$; $k_d = 0,44$; $k_q = 0,56$; $k_f = 1,16$.

В генераторе выбраны радиально намагниченные постоянные магниты призматической формы, охваченные по внешней поверхности биметаллическим кольцом толщиной 6 мм. Материал постоянных магнитов SmCo27 (остаточная индукция $B_r = 1,1$ Тл, коэрцитивная сила по индукции $H_{CB} = 436$ кА/м, $m_M = 2,52 \cdot 10^{-6}$ Вб/Ач, $m_M^* = 2$).

В результате расчётов по приведённым выше зависимостям получены следующие значения параметров, дополняющие исходные данные и позволяющие совместно с ними определить размеры по-

стоянных магнитов: $x_s^* = 0,086$; $x_{aq}^* = 1,116$; $x_{ad}^* = 0,877$; $x_q^* = x_{aq}^* + x_s^* = 1,2$; $x_d^* = x_{ad}^* + x_s^* = 0,953$; $\text{tgy} = 1,205$; $y = 50^\circ 18'$; $\sin y = 0,77$; $\cos y = 0,64$; $B_{ddp}^* = 0,6$; $j(A_p; B_{dp}) = 1,94$; $s_{M,p} = 1,26$; $B_{ddp} = 0,36$ Тл; $B_{Mdp} = 0,454$ Тл.

С учётом полученных данных высота каждого постоянного магнита на один полюс при расчете по (9) $h_M = 3,1$ мм, их ширина

$$b_M = a_i t / a_M = 0,73 \cdot 9,163 = 6,7 \text{ см.}$$

Проверка стабильности магнитных свойств постоянных магнитов. Напряжённость магнитного поля H_{Mdp} при $B_{Mdp} = 0,59$ Тл для постоянного магнита, выполненного из сплава SmCo27, равна 202 кА/м. Для определения стабильности магнитных свойств постоянных магнитов проектируемого генератора при известных координатах точки расчётного режима на характеристике $B_M(H_M)$ достаточно определить кратность тока короткого замыкания. Согласно векторной диаграмме Блонделя (рис. 2)

$$k = \frac{I_K}{I_H} \gg \frac{E_{01}}{x_d I_H} = \frac{3}{i} \frac{1}{x_{ad}^* (1 + x_s^* - d)} \sqrt{1 + x_{aq}^{*2} y_p \cos y_p + \sin y_p} \frac{1}{\psi} = \frac{1}{0,953} \cdot 0,7 + 0,77 = 0,73 + 0,77 = 1,5.$$

Очевидно, размагничивающая постоянные магниты продольная составляющая МДС якоря, приведённая к МДС магнита, при этом увеличивается в 1,5 раза:

$$F_{adk} = 1,5 \frac{\sqrt{2}}{p} A_p t k_{o1} k_{ad} \sin y_p = 559,8 \text{ А,}$$

а напряжённость магнитного поля в магните увеличивается на

$$H_{M,K} = F_{adk} / h_M = 559,8 / 0,31 = 1805 \text{ А/см} \gg 180,5 \text{ кА/м.}$$

Напряжённость магнитного поля в магните в режиме короткого замыкания составляет в результате $H_{M,K} = 202 + 180,5 = 382,5$ кА/м, что меньше коэрцитивной силы сплава по индукции, равной 436 кА/м, в 1,14 раза и свидетельствует о стабильности магнитных свойств постоянных магнитов в генераторе при высоте полюса $h_M = 3,1$ мм.

Вывод. Изложенный алгоритм определения размеров постоянных магнитов, обеспечивающих реализацию электромагнитных нагрузок, принятых на стадии определения главных размеров синхронных генераторов, является более совершенным по сравнению с алгоритмами, на основе которых построены современные методики расчёта синхронных электрических генераторов с возбуждением от постоянных магнитов. Он унифицирован с алго-

ритмом расчёта генераторов с электромагнитным возбуждением в части определения размеров магнитопровода и обмоточных данных статора и максимально учитывает специфику возбуждения электрических машин от постоянных магнитов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: Учебник для вузов в 2-х т. — М: Издательство МЭИ, 2004, т. 1(656 с.), т. 2(532 с.).
2. Сугробов А.М., Русаков А.М. Проектирование электрических машин автономных объектов: Учебное пос. для вузов. — М: Издательский дом МЭИ, 2012, 304 с.
3. Балагуров В.А., Галгеев Ф.Ф. Электрические генераторы с постоянными магнитами. — М: Энергоатомиздат, 1988, 280 с.
4. Зечихин Б.С., Журавлёв С.В., Ситин Д.А. Расчётные коэффициенты синхронных машин с редкоземельными магнитами. — Электричество, 2009, № 3, с. 35–40.

[12.05.15.]

Авторы: Сугробов Анатолий Михайлович окончил электромеханический факультет Московского энергетического института (МЭИ) в 1964 г. В 1973 г.

защитил кандидатскую диссертацию «Исследование и разработка разноимённополюсных индукторных генераторов». Профессор кафедры «Электротехнические комплексы автономных объектов» МЭИ.

Русаков Анатолий Михайлович окончил электромеханический факультет МЭИ в 1976 г. В 1982 г. защитил кандидатскую диссертацию «Разработка вентильных электродвигателей на базе магнитных систем индукторных машин». Ведущий научный сотрудник кафедры «Электротехнические комплексы автономных объектов» МЭИ.

Окунева Надежда Анатольевна закончила электромеханический факультет МЭИ в 2005 г. В 2008 г. защитила кандидатскую диссертацию «Разработка и исследование электропривода нефтедобывающих насосов с погружным магнитоэлектрическим двигателем». Ведущий инженер кафедры «Электротехнические комплексы автономных объектов» МЭИ.

Казимиров Евгений Олегович закончил электромеханический факультет МЭИ в 2013 г. Аспирант кафедры «Электротехнические комплексы автономных объектов» МЭИ.

Elektrichestvo (Electricity), 2015, No.10, pp. 32–37.

An Algorithm for Sizing Rare-Earth Permanent Magnets as Applied to Synchronous Generator Excitation Systems

SUGROBOV Anatolii Mikhailovich (National and Research University «Moscow Power Engineering Institute» (NRU «MPEI»), Moscow, Russia) — Professor, Cand. Sci. (Eng.)

RUSAKOV Anatolii Mikhailovich (NRU «MPEI», Moscow, Russia) — Leading Scientific Researcher, Cand. Sci. (Eng.)

OKUNEYEVA Nadezhda Anatol'yevna (NRU «MPEI», Moscow, Russia) — Leading Engineer, Cand. Sci. (Eng.)

KAZIMIROV Evgenii Olegovich (NRU «MPEI», Moscow, Russia) — Ph. D. Student

An algorithm for sizing the permanent magnets ensuring realization of electromagnetic loads adopted at the stage of determining the main sizes of synchronous generators is elaborated. The proposed algorithm is more advanced as compared with the algorithms used as a basis in modern procedures for calculating synchronous electric generators excited from permanent magnets. For determining the sizes of magnets, their dependences are obtained on the electromagnetic loads adopted in determining the main sizes of generators being designed, as well as on the parameters characterizing the geometry of their pole system, etc. An example of calculating the sizes of permanent magnets for a particular generator is given. A distinguishing feature of the article is that it uses interrelations between the electromagnetic parameters of electrical machines that were not used previously in designing them, or were used in a more intricate form inconvenient for designing. The article should be regarded as an attempt to develop a unified procedure for designing electrical machines equipped with different excitation systems.

Key words: synchronous generator, permanent magnet, excitation system, electromagnetic loads, winding inductive reactances, Blondel diagram

REFERENCES

1. Ivanov-Smolenskii A.V. *Elektricheskiye mashiny* (Electrical machines). Moscow, Publ. House of the Moscow Power Engineering Institute, 2004, t.1(656 p.), t. 2(532 p.).
2. Sugrobov A.M., Rusakov A.M. *Proektirovaniye elektricheskikh mashin avtonomnykh ob'yektov* (Designing electrical machines of

independent objects). Moscow, Publ. House of the Moscow Power Engineering Institute, 2012, 304 p.

3. Balagurov V.A., Galteyev F.F. *Elektricheskiye generatory s postoyannymi magnitami* (Electrical generators with permanent magnets). Moscow, Publ. Energoatomizdat, 1988, 280 p.

4. Zechikhin B.S., Zhuravlev S.V., Sitin D.A. *Elektrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 2009, No. 3, pp. 35–40.

