

УДК 621.313.3

Определение размеров полюсной системы индукторов вентильных синхронных генераторов с возбуждением от постоянных магнитов

А. М. Русаков, А. М. Сугробов*, Е. О. Казимиров,
Н. А. Окунева, А. Н. Соломин

Приведена система уравнений магнитной цепи синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов, определяющая зависимость магнитного потока в воздушном зазоре от магнитодвижущей силы (МДС) постоянных магнитов в расчетном режиме, режимах холостого хода и короткого замыкания. В совокупности с дополняющими данную систему соотношениями между электромагнитными параметрами генераторов и коэффициентами она может быть преобразована в систему уравнений, связывающих размеры полюсной системы генераторов с электромагнитными нагрузками в расчетном режиме и режиме короткого замыкания и позволяющих определить размеры постоянных магнитов, обеспечивающих реализацию в проектируемых генераторах принятых на стадии определения их главных размеров значений электромагнитных нагрузок.

Публикация отличается от опубликованных ранее материалов наличием зависимостей между электромагнитными параметрами электрических машин, которые ранее не использовались при проектировании, либо использовались, но отражали их недостаточно полно. К подобным зависимостям относятся аналитическое выражение для определения коэффициента рассеяния магнитного потока, связывающее значения этого коэффициента с электромагнитными нагрузками, зависимости от электромагнитных нагрузок и геометрии полюсной системы кратности тока короткого замыкания и реактивности генератора по продольной оси от электромагнитных нагрузок. Что касается электромагнитных нагрузок, то выбор их значений в расчетном режиме при проектировании электрических машин с постоянными магнитами может быть осуществлен с учетом областей применения по рекомендациям, разработанным применительно к решению типовых задач проектирования электрических машин общепромышленного применения, автотранспортных средств, авиационных электрических машин или электрических машин, используемых в других областях техники при условии, что эти рекомендации составлены применительно к решению тех же задач, которые поставлены перед разработчиком конкретной электрической машины и применительно к той же системе охлаждения, которую в ней предполагается использовать.

Наличие приведенных в статье зависимостей позволяет повысить точность определения размеров не только полюсной системы генератора, но и размеры всей его активной части. Представленные уравнения взаимосвязи размеров полюсной системы генераторов с возбуждением от постоянных магнитов с их электромагнитными параметрами позволяют исполь-

* SugrobovAM@mpei.ru

зовать при определении размеров их якорей и обмоточных данных те же уравнения и в той же последовательности, что и при определении размеров генераторов с электромагнитным возбуждением. Алгоритм определения размеров активной части генераторов с возбуждением от постоянных магнитов в совокупности с изложенным в статье алгоритмом определения размеров их полюсной системы является при этом более совершенным, по сравнению с алгоритмами, используемыми в настоящее время при проектировании этих машин.

В качестве примера применения полученных аналитических зависимостей в расчетной практике в заключительной части статьи приведены результаты определения размеров полюсной системы индуктора конкретного генератора с возбуждением от постоянных магнитов.

Ключевые слова: синхронный генератор, постоянные магниты и их размеры электромагнитные нагрузки, полюсная система индуктора, индуктивные сопротивления, диаграмма магнита, диаграмма Блонделя, коэффициент рассеяния магнитного потока, кратность тока короткого замыкания.

При отсутствии сведений о размерах и обмоточных данных спроектированных ранее и находящихся в эксплуатации электрических машин, имеющих такие же конструкцию магнитной системы и систему охлаждения, что и электрическая машина, которую предстоит проектировать, и к тому же близких ей по мощности и частоте вращения, приходится перед выполнением оптимизационных расчетов на ЭВМ прибегать к традиционным методикам проектирования электрических машин, основанных на использовании упрощенных математических моделей, позволяющих определить предварительные размеры якоря и обмоточные данные размещенной в его пазах обмотки (обмоток), а также предварительные размеры индуктора и расположенных на нем элементов системы возбуждения (обмоток возбуждения или постоянных магнитов).

Использование в системах возбуждения электрических машин современных материалов постоянных магнитов, обладающих высокими значениями удельной магнитной энергии и коэрцитивной силы, обеспечивает возможность проектирования их на значения электромагнитных нагрузок (линейную нагрузку A и магнитную индукцию в воздушном зазоре B_δ), превышающих значения этих условно независимых переменных в оптимально спроектированных машинах с электромагнитным возбуждением. Это обстоятельство позволяет использовать при выполнении расчетов по определению размеров якоря электрических машин с возбуждением от постоянных магнитов те же уравнения, условно независимые переменные и рекомендации по их выбору и ту же последовательность выполнения расчетов, что и для определения размеров якоря машин с электромагнитным возбуждением.

При рассматриваемом подходе к проектированию синхронных электрических машин с постоянными магнитами, основанном на введении в число исходных данных линейной нагрузки и индукции в воздушном зазоре, определение размеров полюсной системы индуктора осуществляется на заключительном этапе проектного расчета. Перед его выполнением, так же, как и перед определением размеров полюсной системы индукторов электрических машин с электромагнитным возбуждением, помимо диаметра D и длины

l_i рачотки можно считать известными (определенными): все основные размеры магнитопровода якоря, длину воздушного зазора δ , число фаз m , частоту тока f ; число пар полюсов p , число витков в фазе обмотки w_ϕ и распределение ее секций по пазам, активное сопротивление R_ϕ и индуктивное сопротивление рассеяния обмотки x_s , а также все те параметры и коэффициенты, значения которых были выбраны или рассчитаны на этапах расчета, предшествующих определению размеров индуктора. Известными можно считать: расчетный и конструктивный коэффициенты полюсного перекрытия α_p и α_r ; число пазов на полюс и фазу q ; коэффициенты $\delta^* = \delta/\tau$ и $h_{nn}^* = h_{nn}/\tau$ (h_{nn} — высота полюсных наконечников, $\tau = \pi D/2p$ — полюсное деление), характеризующие геометрию полюсной системы; коэффициент воздушного зазора k_δ ; коэффициент k_E , равный отношению электромагнитной мощности P_δ к мощности на нагрузке с обмоточный коэффициент k_{o1} ; коэффициенты пазового λ_n , лобового λ_d и дифференциального λ_d рассеяний и их сумму $\Sigma\lambda$ и другие параметры и коэффициенты.

Что касается электромагнитных нагрузок A и B_δ , то выбор их значений в расчетном режиме A_p и $B_{\delta p}$ при проектировании электрических машин с постоянными магнитами может быть сделан с учетом областей их применения по рекомендациям, разработанным применительно к решению типовых задач проектирования электрических машин общепромышленного применения, автотранспортных средств, авиационных электрических машин или электрических машин, используемых в других областях техники при условии, что эти рекомендации составлены применительно к решению тех же задач, которые поставлены перед разработчиком конкретной электрической машины, и применительно к той же системе охлаждения, которую в ней предполагается использовать.

Размеры полюсов индуктора (высоты и ширины постоянных магнитов) определяются так же, как и размеры полюсов индукторов машин с электромагнитным возбуждением из условия реализации, принятых при определении размеров якоря электромагнитных нагрузок, но другими средствами, а именно, за счет соот-

ветствующего выбора размеров постоянных магнитов при известных габаритных размерах активной части индуктора (известных диаметре $D_{\text{и}}$ и длине $l_{\text{и}}$ его рашточки):

$$D_{\text{и}} = D - 2\delta; l_{\text{и}} \approx l_r.$$

Диаметр D и длина l_i рашточки якоря определяют по формуле Арнольда, которую при выполнении электромагнитных расчетов по первым гармоническим электрическим и магнитным параметрам можно записать в виде:

$$D^2 l_i = \frac{60}{\pi^2} \frac{P_3}{A_p B_{\delta p} n \alpha_i k_B k_{\sigma 1}},$$

где P_3 — электромагнитная (расчетная) мощность; n — частота вращения; $k_B = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \frac{1}{k_\phi} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} k_{\text{ис1}}$ — коэффициент формы ЭДС (k_ϕ , $k_{\text{ис1}}$ — коэффициенты потока [1] и использования магнитного потока учитывают несинусоидальность формы кривой ЭДС).

Электрическая энергия переменного тока, вырабатываемая вентильными генераторами, в том числе и синхронными генераторами с возбуждением от постоянных магнитов, поступает в нагрузку после ее выпрямления и последующего преобразования в электроэнергию постоянного или переменного тока требуемого качества. По этой причине коэффициент мощности $\cos \varphi \approx 1$, а электромагнитная мощность P_3 — активная и может быть определена в зависимости от выпрямленной мощности P_d из выражения [2]:

$$P_3 = k_E k_{\text{п}} 1,2 P_d,$$

где $k_{\text{п}}$ — коэффициент, учитывающий дополнительные потери от высших гармонических полей, появляющихся вследствие несинусоидальной формы кривой фазного тока.

Для определения размеров постоянных магнитов достаточно иметь минимум четыре основных уравнения, одно из которых определяет зависимость магнитной индукции в нейтральном сечении постоянных магнитов в расчетном режиме при воздействии на них продольной составляющей МДС якоря $B_{\text{мдр}}$ от высоты постоянного магнита $h_{\text{м}}$, диаметра индуктора $D_{\text{и}}$ или длины полюсного деления τ и от выбранных при определении размеров якоря электромагнитных нагрузок A_p и $B_{\delta p}$. Второе уравнение определяет зависимость ширины постоянного магнита $b_{\text{м}}$ от магнитной индукции в нейтральном сечении постоянного магнита $B_{\text{мдр}}$ и длины полюсного деления τ при магнитной индукции в зазоре $B_{\delta \text{др}}$:

$$b_{\text{м}} = \frac{B_{\delta \text{др}}}{B_{\text{мдр}}} \sigma_{\text{мр}} \alpha_i \tau, \quad (1)$$

где $\sigma_{\text{мр}}$ — коэффициент рассеяния магнитного потока в расчетном режиме.

Коэффициент рассеяния магнитного потока $\sigma_{\text{мр}} = \Phi_{\text{мдр}} / \Phi_{\delta \text{др}}$ ($\Phi_{\delta \text{др}}$ — продольная составляющая результирующего магнитного потока в воздушном зазоре в расчетном режиме работы генератора) зависит от геометрии и размеров магнитной системы индуктора, а также от характера и силы воздействия на постоянные магниты МДС якоря. Определить точные значения этого коэффициента можно только при полностью сформированной магнитной системе индуктора. На стадии определения размеров постоянных магнитов влияние полей рассеяния учитывается путем выбора предварительных значений коэффициента рассеяния. При этом следует принять во внимание то обстоятельство, что значения этого коэффициента однозначно связаны с положением рабочей точки на прямой магнитного возврата постоянного магнита, построенной в координатах $[\Phi_{\text{м}}; F_{\text{м}}]$ и являющейся отображением в этих координатах прямой KM (рис. 1), построенной в координатах $[B_{\text{м}}; H_{\text{м}}]$. Наименьшее значение коэффициента рассеяния $\sigma_{\text{м0}}$ располагается в точке N_0 , соответствующей работе машины в режиме холостого хода, а наибольшее — в режиме максимального размагничивания. С достаточной для предварительных расчетов 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 i -ом режиме связаны с $\sigma_{\text{м0}}$ зависимостью [3]:

$$\sigma_{\text{ми}} = 1 + (\sigma_{\text{м0}} - 1) \varphi(A_i; B_{\delta i}) \frac{k_{\mu di}}{k_{\mu 0}}, \quad (2)$$

$$\varphi(A_i; B_{\delta i}) = 1 + \frac{\sqrt{2}}{\pi} A_i^* \frac{k_{01} k_{\text{м-d}} \mu_0}{B_{\delta di}^* k_{\mu di} \delta^* k_\delta} \sin \psi_i, \quad (3)$$

где $A_i^* = A_i / B_{\delta i}$; $B_{\delta di}^* = B_{\delta di} / B_{\delta i}$ ($B_{\delta di}$ — магнитная индукция в продольной оси машины в i -ом режиме ее работы); $k_{\mu di}$, $k_{\mu 0}$ — коэффициенты насыщения магнитной цепи машины в продольной оси при нагрузке и при холостом ходе; $k_{\text{м-d}}$ — коэффициент, определяющий ту часть продольной составляющей МДС якоря $F_{\text{дм}}$, которая приложена к каждому полюсу индуктора в i -ом режиме работы машины:

$$F_{\text{м-d}} = F_{\text{дми}} k_{\text{м-d}} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{m I_i w_\phi}{p} k_{\sigma 1} k_{\text{м-d}} \times \\ \times \sin \psi_i = \frac{\sqrt{2}}{\pi} A_i \tau k_{\sigma 1} k_{\text{м-d}} \sin \psi_i;$$

$$k_{\text{м-d}} = \left[1 + \frac{\mu_{\text{м}}^* \delta^* k_\delta}{\alpha_{\text{м}} h_{\text{м}}^*} \left(1 + \frac{B_{\text{м0}}}{\mu_{\text{м}} H_{\text{м0}}} \frac{\sigma_{\text{м0}} - 1}{\sigma_{\text{м0}}} \right) \right]^{-1}; \quad (4)$$

$$(\alpha_{\text{м}} = \alpha_i \tau / b_{\text{м}}),$$

где $B_{\text{м0}}$, $H_{\text{м0}}$ — координаты точки на прямой магнитного возврата KM , соответствующей работе генератора в режиме холостого хода (см. рис. 1); ψ_i — угол между

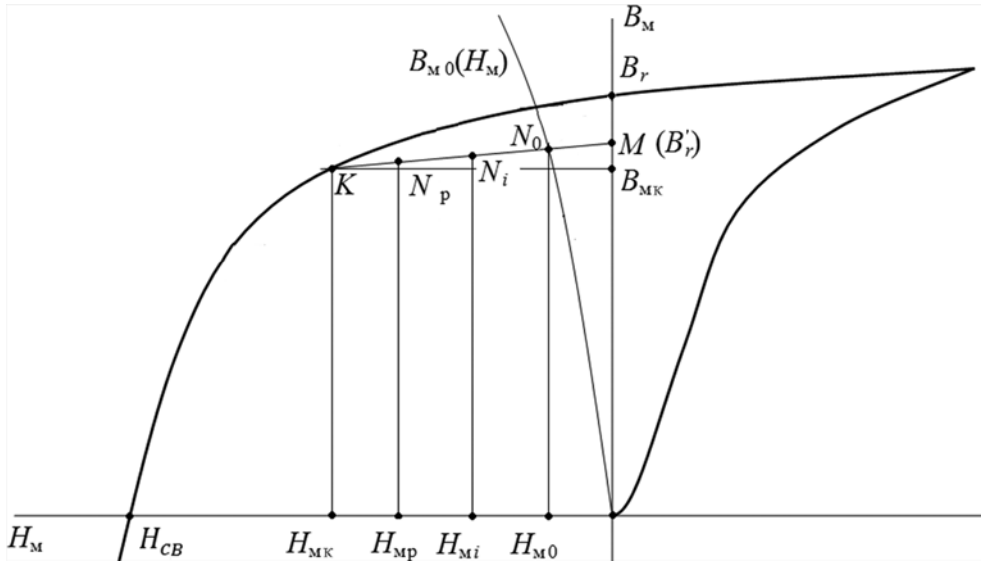


Рис. 1. Диаграмма магнита

векторами ЭДС холостого хода и тока в i -ом режиме (рис. 2).

При электромагнитных расчетах электрических машин с постоянными магнитами коэффициент k_{md} выполняет те же функции, что и коэффициент приведения МДС якоря к МДС возбуждения k_{ad} при расчетах этих же машин, но с электромагнитным возбуждением.

Коэффициент α_m так же относится к числу условно независимых переменных, как и электромагнитные нагрузки. Перед определением размеров постоянных

магнитов им задаются с учетом магнитных свойств материала постоянных магнитов и предполагаемых координат точки расчетного режима на введенной в расчет прямой магнитного возврата. Максимальное значение этого коэффициента равно единице.

Определение угла ψ_i применительно к вентильным электрическим машинам желательно провести с учетом параметров, характеризующих коммутационные процессы (угла коммутации γ_k , эквивалентного индуктивного сопротивления коммутации x_k и др.). Учитывая, однако, то обстоятельство, что для предварительного определения размеров вентильных электрических машин используются традиционные методики расчета синхронных электрических машин по первым гармоническим, работающим на нагрузку непосредственно, а близкие к реальным значения x_k и γ_k можно определить только после определения размеров магнитной цепи, обмоточных данных и индуктивностей проектируемой машины, исходные значения угла ψ_i и других электромагнитных параметров вентильных машин берутся из выражений, полученных для машин с выходом на переменном токе.

Вентильные генераторы выполняются на более высокие частоты по сравнению с генераторами общепромышленного применения, поэтому активные сопротивления фаз в них R_ϕ значительно меньше индуктивного сопротивления рассеяния x_s и им по этой причине можно пренебречь. В этом случае при $\cos\phi = 1$:

$$\psi_i = \arctg \frac{x_{aq} + x_s}{R_{ni}} = \arctg \frac{x_q^*}{\sqrt{z_{ni}^{*2} - x_s^{*2}}}, \quad (5)$$

где R_{ni} — активное сопротивление нагрузки в i -ом режиме; x_{aq} — индуктивное сопротивление по поперечной оси генератора; $z_{ni}^* = z'_{ni} / z'_{np}$ (в расчетном режи-

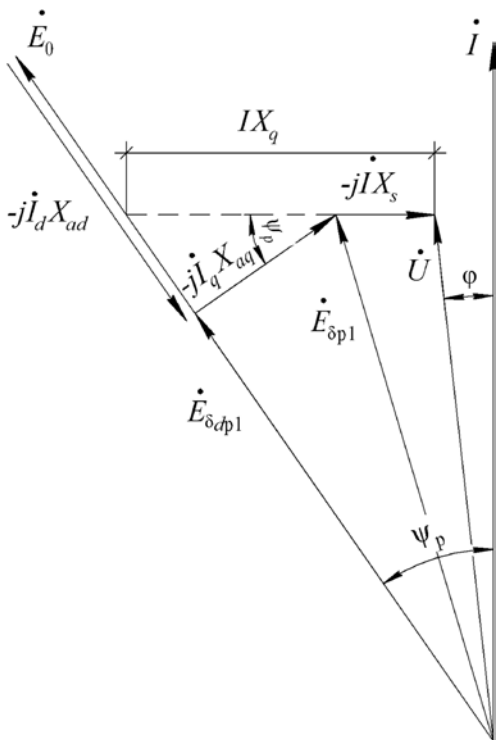


Рис. 2/ Векторная диаграмма Blondеля

ме $z_{hi}^* = 1$, в режиме короткого замыкания $z_{hi}^* = x_s^*$);

$z_{hi}' = \sqrt{R_{hi}^2 + x_s^2}$ — полное сопротивление электрической цепи фазы; $x_{aq}^* = x_{aq} / z_{hp}'$ и $x_s^* = x_s / z_{hp}'$ — сопротивления x_s и x_{aq} , выраженные в долях полного электрического сопротивления фазы z_{hp}' .

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

$$x_{aq}^* = \frac{x_{aq}}{z_{hp}'} = \frac{4\mu_0 m f(w_\phi k_{01})^2 \tau l_i k_q}{\pi p \delta k_\delta} = \frac{\mu_0}{\pi} \frac{k_{01} k_q}{\alpha_i \delta^* k_\delta k_B} A_p^*; \\ x_s^* = \frac{4\pi \mu_0 f w_\phi^2 l_i}{p q} \sum \lambda = \pi \mu_0 \frac{\sum \lambda}{\alpha_i k_B k_{01} m q} A_p^*, \quad (6)$$

где $A_p^* = A_p / B_{\delta p}$; k_q — коэффициенты формы поля якоря по поперечной оси.

Значения коэффициентов σ_{m0} для электрических машин с различными по конструкции роторами и геометрией полюсной системы можно определить, например, по кривым, приведенным в [2], а значения коэффициента k_q — по кривым в [4].

Третье и четвертое уравнения должны относиться, соответственно, к режимам установившегося или ударного короткого замыкания и холостого хода. Они определяют зависимость магнитных индукций в этих режимах работы генератора от высоты постоянного магнита h_{mp} и электромагнитных нагрузок и используются для проверки соответствия координат точки отхода прямой магнитного возврата и коэффициента рассеяния магнитного потока в режиме холостого хода, предварительно принятым их значениям.

В связи с тем, что каждое из перечисленных уравнений содержит параметры, которые на стадии определения размеров постоянных магнитов либо неизвестны (коэффициенты рассеяния магнитного потока, например), либо требуют для своего определения привлечения дополнительных уравнений, либо вообще не могут быть определены из-за отсутствия необходимых для этого данных и ими приходится задаваться, ориентируясь при этом на режим, применительно к которому эти параметры могут быть с достаточной степенью точности определены и пересчитаны на другие режимы. Необходимое для определения размеров число уравнений должно быть увеличено и помимо этого дополнительно численными значениями некоторых параметров. В окончательном варианте совокупность зависимостей, необходимых для определения размеров постоянных магнитов, выглядит следующим образом:

$$B_{mp} = B_r' - \mu_m^* B_{\delta p} B_{\delta dk}^* k_{\mu dp} \delta^* k_\delta \varphi(A_p; B_{\delta k}) / h_{mp}^*; \quad (7)$$

$$B_{mk} = B_r' - \mu_m^* B_{\delta dk}^* B_{\delta p} \delta^* k_\delta k_{\mu dk} \varphi(A_k; B_{\delta k}) / h_{mp}^*; \\ B_{\delta dk}^* = B_{\delta dk} / B_{\delta p} = k x_s^*; \quad (8)$$

$$B_{m0} = \frac{B_r'}{1 + \mu_m^* \delta^* k_\delta k_{\mu 0} / h_{mp}^* \alpha_m \sigma_{m0}}; \quad (9)$$

$$\varphi(A_p; B_{\delta p}) = 1 + \frac{\sqrt{2}}{\pi} A_p^* \frac{k_{01} k_{m-d} \mu_0}{B_{\delta dp}^* k_{\mu dp} \delta^* k_\delta} \sin \psi_p;$$

$$\varphi(A_k; B_{\delta k}) = 1 + \frac{\sqrt{2}}{\pi} A_p^* k \frac{k_{01} k_{m-d} \mu_0}{B_{\delta dk}^* k_{\mu dk} \delta^* k_\delta} \sin \psi_k; \quad (10)$$

$$H_{mi} = \frac{1}{\mu_m} (B_r' B_{mi}). \quad (11)$$

$h_{mp}^* = h_{mp} / \tau$ в (7) — (9) — высота постоянных магнитов в долях полюсного деления.

Совместным решением уравнения (7) с дополнительными его зависимостями является следующее выражение для определения высоты постоянных магнитов (при определении ее, исходя из значений входящих в него электромагнитных параметров расчетного режима):

$$h_{mp}^* = \frac{\mu_m^* B_{\delta p} B_{\delta dk}^* k_{\mu dp} \delta^* k_\delta \varphi(A_p; B_{\delta p})}{B_r' - B_{\delta p} \sqrt{1 - x_{aq}^{*2} \cos^2 \psi_p}}. \quad (12)$$

При $R_\phi \rightarrow 0$ угол $\psi = \pi/2$, поэтому кратность тока короткого замыкания k в (8) и (10) можно определить как:

$$k = E_{0k} / x_d I_H.$$

Представив в (12) ЭДС E_{0k} , индуцируемую постоянными магнитами в режиме короткого замыкания, в виде $E_{0k} = E_{0p} k_{Ek}$, где $k_{Ek} = 1,05 - 1,1$ — коэффициент, учитывающий возрастание ее вследствие изменения магнитного состояния магнитопровода (перехода ее при коротком замыкании в ненасыщенное состояние), а также приняв во внимание (5), и, что $R_H^2 = z_H'^2 - x_s^2$, получим (см. рис. 2):

$$k = \frac{E_{0p}}{x_d I_H} = \frac{k_{Ek} I_H (x_d \sin \psi_p + R_H \cos \psi_p)}{x_d I_H} = \\ = \frac{(1 + x_d^* x_q^* - x_s^{*2})}{x_d^* \sqrt{1 + x_q^{*2} - x_s^{*2}}} k_{Ek}. \quad (13)$$

Относительное значение индуктивного сопротивления по продольной оси [3]:

$$x_d^* = x_{ad}^* + x_s^* = \frac{\mu_0}{\pi} \frac{k_{01} k_d k_{\delta-d}}{\alpha_i \delta^* k_\delta k_B} A_p^* + x_s^*. \quad (14)$$

Коэффициент $k_{\delta-d} = 1 - k_{m-d}$ показывает какая часть МДС якоря F_{dm} приложена к воздушному зазору.

$$k_{\delta-d} = \left[1 + \frac{\alpha_m h_m^*}{\mu_m^* \delta^* k_{\delta} \left(1 + \frac{B_{m0}}{\mu_m H_{m0}} \frac{\sigma_{m0} - 1}{\sigma_{m0}} \right)} \right]^{-1} \quad (15)$$

Для решения системы уравнений (1) и (7) — (9) относительно высоты полюсов постоянных магнитов $h_{m.p}^*$, определения координат точки короткого замыкания N_K отхода прямой магнитного возврата $[B_{mk}^*; H_{mk}^*]$, а также определения координат точек на прямой магнитного возврата, соответствующих работе машины в расчетном режиме $[B_{mp}^*; H_{mp}^*]$ и режиме холостого хода $[B_{m0}^*; H_{m0}^*]$, можно предложить следующую последовательность выполнения промежуточных расчетов:

1. Применительно к выбранному сплаву постоянных магнитов необходимо задаться координатами точки отхода прямой магнитного возврата $[B_{mk}^*; H_{mk}^*]$, а также значением коэффициента $\alpha_m = \alpha_{mp}$, принятым за расчетное.

2. Определить значения магнитной индукции в нейтральном сечении постоянного магнита B_{m0} и H_{m0} для нескольких значений относительной высоты постоянных магнитов h_{mp}^* , используя для этого уравнения (9) и (11), а также значения коэффициентов рассеяния магнитного потока для расчетного режима σ_{mp} и режима короткого замыкания σ_{mk} из (2) и (3), коэффициентов k_{m-d} , $k_{\delta-d}$ из (4) и (15), относительных значений индуктивных сопротивлений x_{ad}^* , x_{aq}^* и x_s^* из (6) и (14), кратности тока короткого замыкания из выражения (13), углов ψ_p из (9) и функций $\sin \psi_p$ и $\cos \psi_p$.

3. Для принятых значений h_{mp}^* из уравнения (12) при определенных в п. 1, 2 численных значениях параметров найти соответствующие им значения относительной высоты полюсов постоянных магнитов h_{mp}^* и сопоставить их с h_{mp}^* . Расчеты повторяются до тех пор, пока разница между принятыми значениями высоты постоянных магнитов h_{mp}^* и вычисленными их значениями h_{mp}^* не окажется в диапазоне допустимых ее значений. Относительное значение высоты полюсов постоянных магнитов, при которой получен этот результат, принимается за искомую, обеспечивающую реализацию в проектируемой машине выбранных на стадии определения ее главных размеров электромагнитных нагрузок A_p , $A\delta_p$. Для найденного окончательного значения h_{mp}^* определяются абсолютная величина высоты постоянных магнитов $h_{mp} = h_{mp}^* \tau$ и из (1) их ширина b_{mp} .

4. Из уравнения (8) определяется значение магнитной индукции в точке расчетной прямой магнитного возврата, соответствующей режиму короткого замыкания проектируемого генератора B_{mk}^* , найденное ее значение сопоставляется с B_{mk} и делается заключение

о стабильности магнитных свойств постоянных магнитов.

5. Из уравнения (9) получается окончательное значение магнитной индукции B_{m0} .

6. Находится высота полюсных наконечников $h_{пн}$. Предварительные ее значения могут быть вычислены в соответствии с рекомендациями, приведенными в [2].

7. В полном соответствии с традиционной методикой выполнения проектного расчета синхронных электрических машин с электромагнитным возбуждением находятся размеры спинки индуктора и диаметр вала.

Приведем пример определения размеров полюсной системы индуктора с призматическими редкоземельными постоянными магнитами ($B_r' = B_r$), охваченного биметаллическим цилиндром.

Исходные данные: мощность генератора $P = 90$ кВт, число фаз $m = 3$; частота вращения $n = 8000$ об/мин; напряжение $U = 220$ В; число пар полюсов $p = 3$; постоянные магниты имеют призматическую форму и по внешнему диаметру охвачены биметаллическим кольцом, материал магнитов — сплав КС25ДЦ-225 (магнитные свойства сплава при рабочей температуре $B_r = 1,1 \cdot 10^{-6}$ Тл; $H_{cb} = 780$ кА/м; $\mu_m \approx B_r / H_{cb} = 1,4$ Вб/А·м; $\mu_m^* \approx \mu_m / \mu_0 = 1,115$).

Численные значения условно независимых переменных и коэффициентов и электромагнитных параметров, вычисленных на стадии определения размеров магнитопровода статора и обмоточных данных: $A = 400$ А/см; $B_{\delta} = 0,6$ Тл; $\alpha_i = 0,765$; $k_{o1} = 0,95$; $k_B = 1,1$; $k_E = 1,05$; $k_{\mu 0} = 1,3$; $k_{\mu \phi} = 1,1$; $k_{\mu dk} = 1,05$; $\delta^* = \delta / \tau = 0,0194$ ($\delta = 1$ мм; $\tau = 51,44$ мм); $k_{\delta} = 1,04$; $\sigma_{m0} = 1,15$; $x_{ad}^* = 0,252$; $x_{aq}^* = 0,686$; $x_s^* = 0,151$; $x_d^* = 0,403$; $x_q^* = 0,837$; $R_{\phi}^* = 0,0144$. Коэффициент α_m принят равным 1,15.

Согласно полученным результатам, высота постоянных магнитов $x_m = 5$ мм; их ширина $b_m = 35$ мм; значения магнитных индукций в расчетном режиме B_{mp} , режиме короткого замыкания B_{mk} и режиме холостого хода B_{m0} равны соответственно 0,859, 0,643 и 0,911 Тл; напряженности магнитного поля в тех же режимах $H_{mp} = 171$ кА/м, $H_{mk} = 324$ кА/м, $H_{m0} = 134$ кА/м; коэффициенты рассеяния в расчетном режиме и режиме короткого замыкания $\sigma_{mp} = 1,26$, $\sigma_{mk} = 2,265$, кратности тока короткого замыкания $k = 2,2$; коэффициенты $k_{\delta-d} = 0,23$, $k_{m-d} = 0,77$.

Придерживаясь изложенного алгоритма, целесообразно определить размеры полюсной системы индуктора для нескольких значений коэффициента α_m . Характер изменения в функции этого коэффициента высоты полюсов постоянных магнитов h_{mp} и объема, занимаемого ими в активной части индуктора, можно оценить по кривым, приведенным на рис. 3. Результаты промежуточных расчетов высоты и ширины постоянных магнитов в том же диапазоне значений коэффициента ($\alpha_m = 1; 1,05; 1,1; 1,2; 1,3$ и $1,4$) внесены в приведенную ниже таблицу.

Результаты промежуточных расчетов размеров постоянных магнитов

α_m	B_{m0} , Тл	H_{m0} , кА/м	B_{mp} , Тл	H_{mp} , кА/м	B_{mk} , Тл	H_{mk} , кА/м	$\varphi(A_p; B_{\delta p})$	$\varphi(A_k; B_{\delta k})$
1	0,836	187	0,792	218	0,57	375	1,961	9,79
1,05	0,861	169	0,813	203	0,587	366	1,958	10,013
1,1	0,887	151	0,836	187	0,604	351	2,009	10,233
1,15	0,911	134	0,859	171	0,643	324	2,032	10,44
1,2	0,933	118	0,881	153	0,651	318	2,052	10,63
1,3	0,975	88,6	0,927	123	0,714	273	2,091	10,98
1,5	1,043	40,3	1,012	62	0,874	160	2,152	11,537
α_m	σ_{mp}	σ_{mk}	k	k_{m-d}	$k_{\delta-d}$	b_{mp} , мм	h_{mp} , мм	
1	1,249	2,187	2,039	0,717	0,275	37	4,15	
1,05	1,252	2,213	2,108	0,735	0,257	36	4,5	
1,1	1,255	2,24	2,181	0,753	0,24	35	4,95	
1,15	1,258	2,265	2,181	0,77	0,223	35	5,48	
1,2	1,26	2,288	2,339	0,785	0,208	34	6,1	
1,3	1,265	2,33	2,507	0,814	0,18	32	7,85	
1,5	1,273	2,398	2,853	0,859	0,136	30	16,5	

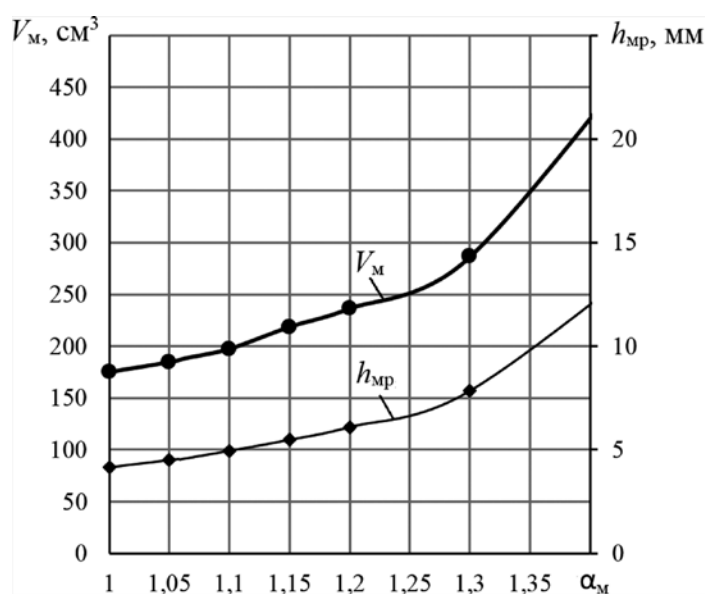


Рис. 3. Зависимости размеров постоянных магнитов (высоты h_{mp} и ширины b_{mp}) и их объема V_m от коэффициента α_m

Таким образом, приведенные уравнения для определения размеров полюсной системы индукторов синхронных генераторов с возбуждением от постоянных магнитов с дополняющими их зависимостями между

электромагнитными параметрами этих машин и в совокупности с уравнениями, используемыми для определения размеров якоря генераторов с электромагнитным возбуждением, позволяют более обоснованно по сравнению с используемыми в настоящее время для решения тех же задач методиками проектирования и при учете большего числа параметров определять размеры постоянных магнитов и размеров магнитопровода индуктора.

Литература

1. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. М: Изд-во МЭИ, 2004.
2. Балагуров В.А., Галтеев Ф.Ф. Электрические генераторы с постоянными магнитами. М: Энергоатом-издат, 1988.
3. Сугробов А.М., Русаков А.М. Проектирование электрических машин автономных объектов. М: Издательский дом МЭИ, 2012.
4. Балагуров В.А. Проектирование специальных электрических машин. М.: Высшая школа, 1982.

Статья поступила в редакцию 15.04.2016