

Авиационные генераторы с постоянными магнитами

ЗЕЧИХИН Б.С., ЖУРАВЛЕВ С.В., МИСЮТИН Р.Ю.

Единичная мощность авиационных генераторов достигает сотен киловольт-ампер. С целью снижения удельной массы генераторы разрабатываются на предельно допустимые по прочности значения частоты вращения. При увеличении единичной мощности авиационных генераторов система возбуждения на основе высокоэнергетических постоянных магнитов может рассматриваться как альтернатива электромагнитной системе возбуждения. Это обусловлено тем, что магниты по объему в несколько раз меньше, чем ферромагнитные полюсы с обмотками, и генераторы с постоянными магнитами могут выполняться с ротором меньшей массы и диаметром вала, в несколько раз большим, чем при электромагнитном возбуждении, что позволяет повысить их критическую частоту и предельную мощность. Кроме того, ротор с постоянными магнитами является более прочным и может быть спроектирован на более высокие значения частоты вращения и большее число полюсов, чем при электромагнитном возбуждении. Генераторы с постоянными магнитами имеют повышенные значения КПД и перегрузочной способности. Роторы с тангенциальными магнитами обеспечивают более высокие значения магнитной индукции в рабочем зазоре, чем роторы с радиальными магнитами, и позволяют снизить длину высокооборотного генератора при практически неизменной массе. Однако генераторы с радиальными магнитами обладают более прочным ротором и могут быть выполнены на большие значения мощности и частоты вращения, чем генераторы с тангенциальными магнитами. Среди многих конструктивных схем роторов наиболее простыми являются схемы роторов с немагнитными обоями, а наиболее эффективными – схемы с обоями из градиентного материала. Наиболее рационально использование многополюсных генераторов с постоянными магнитами в системах постоянного тока при работе с электронными преобразователями.

К л ю ч е в ы е с л о в а: авиационный генератор, генератор с постоянными магнитами, математическая модель постоянного магнита, конструктивные схемы ротора

Авиационные генераторы преобразуют часть механической энергии авиадвигателей в электрическую и являются первичными источниками электроэнергии систем электроснабжения самолетов (СЭС). Основными системами электроснабжения являются системы переменного тока стабильной частоты 400 Гц и «плавающей» частоты 360–800 Гц напряжением 115/200 В и постоянного тока повышенного напряжения 270 В. Мощность электроэнергетических систем самолетов непрерывно возрастает. Разрабатываются концепции полностью электрифицированных самолетов. Постоянно растет единичная мощность генераторов, достигающая более 200 кВА.

Привод генераторов осуществляется непосредственно от авиадвигателей или с использованием привода постоянных оборотов. Конструктивно авиационные генераторы в качестве агрегатов входят в состав авиадвигателей и проектируются на ограниченный срок службы, определяемый ресурсом авиадвигателей. Это позволяет повышать их частоту вращения при обеспечении необходимой смазки и охлаждения подшипников, а также использовать традиционные изоляционные материа-

лы при повышенных температурах. Использование интенсивных систем охлаждения дает возможность повышать плотность электрических и магнитных нагрузок генераторов [1–3]. Механическая прочность вращающихся частей обеспечивается за счет использования материалов повышенной прочности. Все это позволяет разрабатывать авиационные генераторы с высокими показателями удельной массы.

Повышение единичной мощности генераторов привело к отказу от использования промежуточных приводов постоянных оборотов, которые имеют ряд недостатков: невысокие значения КПД, малый ресурс работы, высокие эксплуатационные расходы, низкую ремонтпригодность и др. Для систем электроснабжения самолетов повышенной мощности перспективными считаются системы с непосредственным приводом генераторов от авиадвигателей. И это несмотря на то, что из-за изменения частоты вращения авиадвигателей генераторы оказываются более тяжелыми, так как должны обеспечивать необходимую мощность при наименьших оборотах авиадвигателей. При этом электроэнергия переменного тока стабильной частоты и постоян-

ного тока централизованно или децентрализованно (для отдельных групп потребителей) получается с помощью электронных устройств.

В этих условиях важно оценить возможность повышения единичной мощности генераторов за счет применения постоянных магнитов [4].

Авиационные генераторы с электромагнитным возбуждением и с постоянными магнитами. Наиболее эффективными с точки зрения массы и КПД является применение авиационных синхронных генераторов с электромагнитным возбуждением. Синхронные возбуждатель и подвозбудитель обеспечивают регулирование, бесконтактность и автономность генераторов. Использование асинхронного возбуждателя позволяет обеспечить стартерный режим авиационного генератора. Однако объединение в одном агрегате трех машин и наличие вращающегося выпрямителя существенно усложняет конструкцию. В СЭС постоянного тока повышенного напряжения и переменного тока стабильной частоты генераторы работают в системе с электронными преобразователями с управляемыми выпрямителями, инверторами и фильтрами, сглаживающими пульсации напряжения. При этом для снижения массы фильтров генератор выполняется с повышенным числом полюсов и фаз.

Синхронные генераторы с электромагнитным возбуждением и с постоянными магнитами отличаются конструкцией роторов при практически одинаковой конструкции статора.

Генераторы с электромагнитным возбуждением обычно выполняются с явнополюсной и реже с неявнополюсной конструкцией ротора (рис. 1). Недостатки генераторов с роторами неявнополюсной конструкции: трудности выполнения ротора с числом полюсов более 6 и потери при выполнении ротора массивным. При повышенных мощности и частоте вращения достаточно сложно выполнить большое число полюсов и в генераторах с явнополюсной конструкцией ротора.

В генераторах с постоянными магнитами используется многообразие конструктивных схем роторов. Основные из них – конструкции с радиально и тангенциально намагниченными магнитами (рис. 2). Механическая прочность роторов обеспечивается применением бандажей. В генераторах с постоянными магнитами выполнение большого числа полюсов не вызывает затруднений.

Использование высокоэнергетических редкоземельных постоянных магнитов с $B_r = 1 \div 1,2$ Тл и H_c до 8000 А/см и более привело к тому, что объем и масса постоянных магнитов в системе возбуждения синхронных генераторов в несколько раз меньше объема и массы ферромагнитных полюсов с обмотками, используемых в генераторах с электромагнитным возбуждением [5]. Это показано на рис. 3,

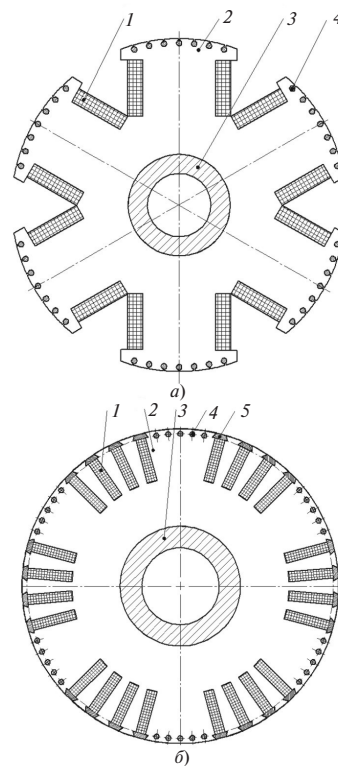


Рис. 1. Явнополюсная (а) и неявнополюсная (б) конструктивные схемы роторов генераторов с электромагнитным возбуждением: 1 – обмотка возбуждения; 2 – магнитопровод ротора; 3 – вал; 4 – стержни демпферной обмотки; 5 – клин

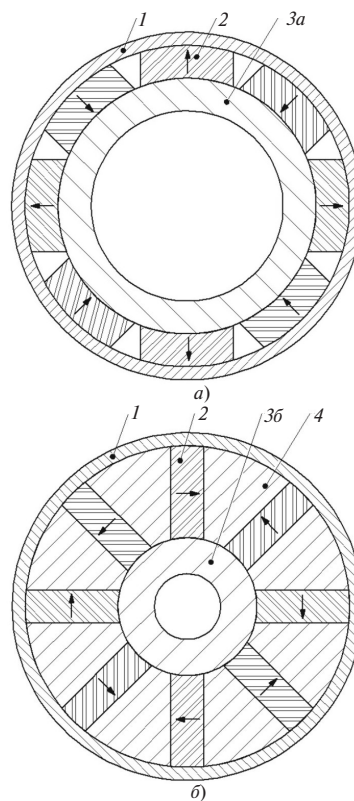


Рис. 2. Конструктивные схемы роторов генераторов с постоянными магнитами: а – с радиально намагниченными постоянными магнитами; б – с тангенциально намагниченными постоянными магнитами; 1 – обойма ротора (в представленных схемах из немагнитного материала); 2 – постоянный магнит; 3а – немагнитный вал; 3б – немагнитный вал; 4 – ферромагнитный полюс

где изображена конструктивная схема ротора авиационного генератора с радиально намагниченными постоянными магнитами мощностью 120 кВА и частотой вращения 8000 об/мин.

При электромагнитном расчете, определяющем выходные параметры генератора, базовыми размерами являются осевая длина пакета статора l_δ и его внутренний диаметр D . Они связаны с его номинальной мощностью S_n основным расчетным уравнением [6, 7]:

$$D^2 l_\delta = \frac{S_p}{\sigma_{\text{и}} n}, \quad (1)$$

где $S_p = S_n E_{\text{отн}}$ – расчетная мощность, которая на 5–15% выше номинальной; $E_{\text{отн}}$ – коэффициент, учитывающий падение напряжения на активном и индуктивном сопротивлении рассеяния обмотки якоря; n – частота вращения; $\sigma_{\text{и}}$ – коэффициент использования генератора. При этом

$$\sigma_{\text{и}} = \frac{\pi^2}{60} \alpha_i k_B k_o A B_\delta, \quad (2)$$

где α_i – расчетный коэффициент полюсного перекрытия; k_B – коэффициент формы ЭДС; k_o – обмоточный коэффициент якоря по основной гармонической; A – линейная нагрузка якоря; B_δ – индукция в рабочем зазоре. Наружный диаметр рото-

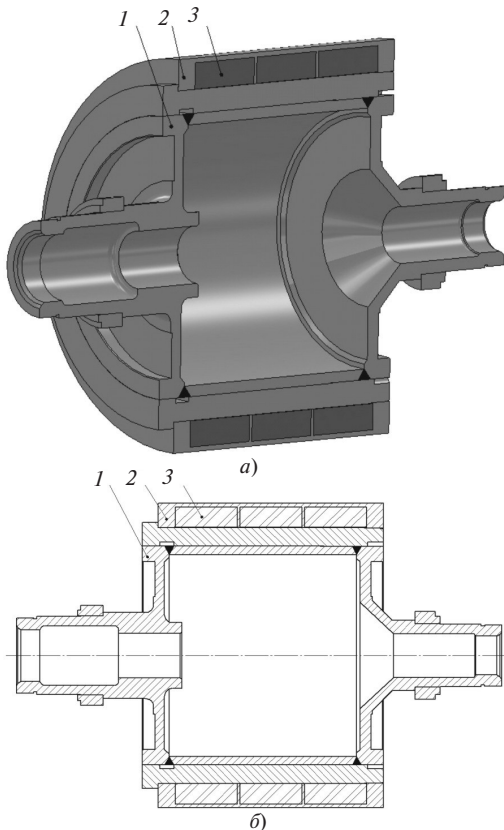


Рис. 3. Конструктивная схема ротора авиационного генератора с радиально намагниченными постоянными магнитами: 1 – вал; 2 – немагнитная обойма; 3 – постоянные магниты

ра $D_p = D - 2\delta$, определяющий прочность генератора, мало отличается от внутреннего диаметра статора D , так как рабочий зазор между ротором и статором $\delta \ll D$. Также длина пакета ротора практически не отличается от длины пакета статора.

Из (1) следует, что при максимально допустимом по прочности диаметре ротора и предельно допустимых n , A и B_δ увеличение мощности возможно за счет увеличения осевой длины l_δ . Однако увеличение длины ротора ограничивается его критической частотой, зависящей от диаметра, длины вала и массы ротора генератора. Существенное увеличение прочности, критической частоты ротора и предельной мощности генераторов с электромагнитным возбуждением возможно при использовании роторов с неявнополюсной массивной конструкцией, которая эффективно применяется в промышленной электроэнергетике. Для генераторов с электромагнитным возбуждением и шихтованным ротором в СЭС переменного тока с частотой 360–800 Гц мощность в 250–300 кВА при максимально допустимой по прочности частоте вращения близка к предельной.

Повышение предельной мощности генератора за счет снижения частоты вращения приводит к увеличению его относительной массы. При этом масса генератора может быть больше, чем масса двух генераторов такой же суммарной мощности при более высоких оборотах. В пределах допустимой прочности ротора в геометрически подобных генераторах увеличение мощности позволяет снизить удельную массу пропорционально корню четвертой степени [6]. Так, увеличение мощности в два раза снижает удельную массу примерно на 16%. Традиционно на каждом авиадвигателе устанавливается один генератор. На самолете В-787 на двигателях установлено по два генератора мощностью 250 кВА с повышенной частотой вращения. Выполнение одного генератора мощностью 500 кВА на ту же частоту вращения затруднительно из-за ограничения по критической частоте, а кроме того, при использовании двух генераторов повышается надежность системы электроснабжения самолета.

При проектировании генераторов электромагнитный расчет является базовым, а прочностной, тепловой и вентиляционный расчеты формируют функциональные ограничения.

Генераторы с высокоэнергетическими постоянными магнитами за счет относительно небольших размеров магнитов могут выполняться с ротором меньшей массы и диаметром вала, существенно большим, чем при электромагнитном возбуждении. Важными недостатками генераторов с постоянными магнитами являются отсутствие возможности стабилизации напряжения генератора за счет изменения потока возбуждения, а также отсутствие воз-

возможности ослабления потока магнитов при внутреннем коротком замыкании якоря за счет развозбуждения генератора.

При увеличении единичной мощности и повышенной частоте вращения авиационных генераторов система возбуждения на основе высокоэнергетических постоянных магнитов может рассматриваться как альтернативная электромагнитной системе возбуждения.

Генераторы с радиальными и тангенциальными магнитами. При проектировании генераторов необходим сопоставительный анализ преимуществ и недостатков конструктивной схемы ротора с радиальными или тангенциальными магнитами.

Магнитодвижущие силы тангенциальных магнитов включены параллельно и могут создавать в рабочем зазоре более высокое значение магнитной индукции B_δ , чем МДС радиальных магнитов, включенные последовательно. При этом в соответствии с основным расчетным уравнением за счет повышения магнитной индукции в рабочем зазоре B_δ эти генераторы имеют существенно меньший объем ротора $D^2 l_\delta$. Увеличение индукции в рабочем зазоре при предельном по механической прочности диаметре ротора снижает осевую длину l_δ . На этом основании считается, что генераторы с тангенциальными магнитами превосходят по объему и удельной массе генераторы с радиальными магнитами. Однако основное расчетное уравнение не определяет общий объем и массу генератора. Магнитный поток генератора определяется произведением $B_\delta l_\delta$, поэтому при увеличении B_δ и пропорциональном уменьшении l_δ остается неизменным.

Это означает, что при сохранении неизменных значения индукции в элементах магнитной цепи ее масса не снижается. Она возрастает из-за необходимости увеличения ширины зубца и при сохранении площади обмотки роста высоты паза, а также увеличения среднего диаметра и высоты ярма статора. Увеличение высоты паза, в свою очередь, ведет к увеличению индуктивного сопротивления рассеяния обмотки и соответственно к увеличению расчетных значений ЭДС и мощности S_p . Увеличение наружного диаметра статора приводит к увеличению его массы по сравнению со статором при более низком значении B_δ в генераторах с радиальными магнитами. Кроме того, между тангенциальными магнитами располагается полюсный наконечник, соизмеримый по массе с массой магнитов. Это приводит к необходимости увеличения размеров бандажа и увеличению массы генератора. В то же время при снижении l_δ уменьшается длина корпуса и вала генератора.

Положительным моментом при проектировании генераторов с тангенциальными постоянными магнитами является возможность выбора таких размеров постоянных магнитов, при которых использование их энергии близко к максимуму. Однако в соответствии с достаточными условиями максимума для многомерных систем (положительная или отрицательная определенность матрицы Гессе) оптимум отдельного элемента не является достаточным условием оптимума системы. Так, при максимальной энергии тангенциальных магнитов магнитная индукция магнитов существенно ниже B_r , что приводит к увеличению массы магнитов. Тангенциальное расположение магнитов, как показано на рис. 2, уменьшает диаметр вала ротора.

В генераторах с радиальными магнитами повышение магнитной индукции B_δ возможно за счет увеличения высоты магнитов, при котором B_δ приближается к B_r , или при использовании марок магнитов с большими значениями B_r и пониженными значениями H_c , что также приводит к увеличению их размеров и массы. Расчеты показывают, что с учетом магнитных свойств электротехнических сталей, используемых при изготовлении статоров, и допустимого насыщения зубцов рациональное значение B_δ находится в диапазоне $0,7 \div 1,0$ Тл. В генераторах с радиальными постоянными магнитами ферромагнитное ярмо индуктора обладает необходимой механической прочностью и может использоваться даже в качестве элемента бандажа. Последовательное включение радиальных магнитов позволяет эффективно использовать редкоземельные магниты с высокими значениями H_c , в то время как их значения B_r практически те же, что и у обычных магнитов.

Отмеченные преимущества конструктивной схемы ротора с радиальными магнитами были учтены при разработке авиационного генератора мощностью 120 кВА, ротор которого представлен на рис. 3.

Особенности генераторов с постоянными магнитами. При рассмотрении генераторов с постоянными магнитами используются два подхода: на основе сосредоточенных параметров с позиции теории цепей и распределенных параметров с позиции теории поля [8].

На рис. 4 представлены характеристики (участки петли гистерезиса во втором квадранте) высокоэнергетических постоянных магнитов SmCo и NdFeB. Важная особенность характеристик в том, что они не проходят через нуль, поэтому постоянные магниты являются активными элементами магнитной цепи. На участке, близком к B_r , где обычно используется магнит, $dB/dH \approx \mu_0$, и зависимость $B=f(H)$ близка к линейной. На этом участке реальная характеристика магнита может быть

приближенно заменена прямой $B_r H'_c$, при этом $B(H) = B_r + \mu_0 H$. Сравнивая эту зависимость с выражением $B(H) = \mu_0 [H + J(H)]$ для намагниченной среды, где $J(H)$ – намагниченность, получаем для участка с $dB/dH \approx \mu_0$, что $J(H) = B_r / \mu_0 \approx \text{const}$. Постоянство $J(H)$ объясняет тот факт, что редкоземельные магниты не размагничиваются на воздухе, однако при их использовании важно учитывать сильную зависимость характеристик магнитов от температуры.

На рис. 5,а представлена схема замещения генератора с постоянными магнитами по продольной оси машины. Постоянный магнит представляется активным элементом магнитной цепи по аналогии с электрическим аккумулятором – активным элементом электрической цепи. В схеме замещения генератора магнит может быть представлен МДС $F_c = H_c h_M$, создающей в режиме короткого замыкания магнитный поток $\Phi_r = B_r S_M$, где h_M и S_M – размер призматического магнита в направлении намагничивания и площадь магнита по нормали к этому направлению. Магнитное сопротивление магнита $R_M = F_c / \Phi_r$ в несколько раз больше магнитного сопротивления зазора R_δ . Большое значение R_M обусловлено низкой магнитной проницаемостью магнита, близкой к μ_0 . Большое магнитное сопротивление R_M ослабляет магнитный поток реакции якоря Φ_{ad} , ЭДС реакции якоря E_{ad} и главное индуктивное сопротивление X_{ad} , обусловленные продольной МДС якоря F_{ad} . В схеме замещения: $R_{\sigma M}$ – магнитное сопротивление, определяю-

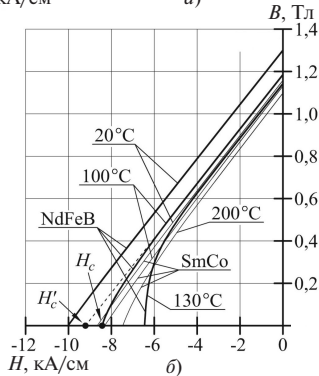
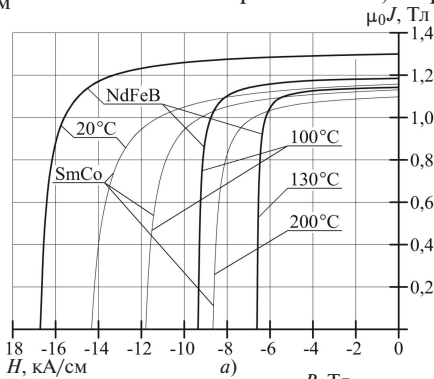


Рис. 4. Характеристики высокоэнергетических постоянных магнитов: а – по намагниченности; б – по магнитной индукции

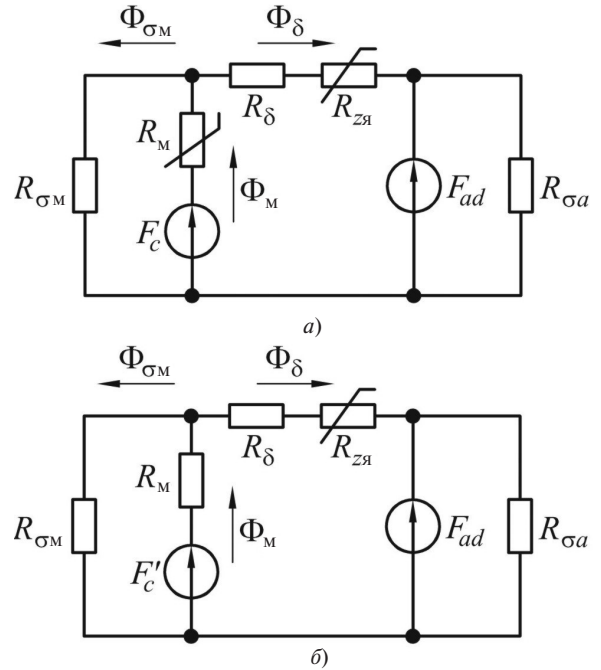


Рис. 5. Схема замещения генератора с постоянными магнитами по продольной оси машины: а – с нелинейным магнитом; б – с линеаризованным магнитом

щее магнитный поток рассеяния между магнитами; R_δ – магнитное сопротивление рабочего зазора; $R_{з\text{я}}$ – магнитное сопротивление зубцов и ярма якоря; $R_{\sigma a}$ – магнитное сопротивление потокам рассеяния якоря; Φ_M – магнитный поток постоянного магнита; Φ_δ – магнитный поток через рабочий зазор; $\Phi_{\sigma M}$ – магнитный поток рассеяния между магнитами.

На рис. 5,б представлена схема замещения магнитной цепи генератора с линеаризованной характеристикой магнита. Постоянный магнит представлен активным элементом магнитной цепи с МДС $F'_c = H'_c h_M$ и внутренним линейным сопротивлением $R_M = \frac{h_M}{\mu_0 S_M}$.

В генераторах с постоянными магнитами X_{ad} много меньше, чем в генераторах с электромагнитным возбуждением. В генераторах с немагнитным бандажом и радиальными магнитами $X_{aq} = X_{ad}$, как в неявнополюсных генераторах с электромагнитным возбуждением, а в генераторах с тангенциальными магнитами $X_{aq} > X_{ad}$. В генераторах с биметаллической обоймой или обоймой из градиентного материала X_{aq} аналогично по значению X_{aq} генераторов с электромагнитным возбуждением. Увеличение X_{aq} , как это следует из диаграммы напряжений синхронного генератора, ведет к росту угла ψ и МДС продольной реакции якоря F_{ad} .

При исследовании нестационарных режимов генераторов каждый постоянный магнит может быть представлен в цепи якоря потокоцеплением Ψ_M ,

равным произведению потока магнита с синусоидальным пространственным распределением и витков соответствующей фазы обмотки якоря.

Характер распределения магнитного поля в рабочем зазоре, система расчетных коэффициентов α_i , k_B , k_{ad} , k_{aq} и сосредоточенные параметры X_{ad} и X_{aq} диаграммы напряжений определяются на основе теории поля для конкретной геометрии магнитов и всей активной зоны [6].

Для магнита с линейной характеристикой возможно представление магнита магнитными зарядами на его поверхностях, нормальных к направлению намагниченности \vec{J} , или токами намагниченности на поверхностях магнита, параллельных намагниченности \vec{J} . В обоих случаях магнитное поле может быть описано уравнением Лапласа для скалярного или векторного магнитного потенциала в полярной или декартовой системе координат. При этом выражения, описывающие распределение магнитного поля, совпадают. В [9] методом гармонического анализа магнитных полей сложных зон на основе объединения методов Фурье и Галеркина с использованием скалярного магнитного потенциала получено решение для активной зоны с радиальными редкоземельными постоянными магнитами. Согласно этому решению индукция магнитного поля редкоземельных постоянных магнитов в рабочем зазоре при холостом ходе определяется выражением:

$$B_{\delta_{xx}} = \frac{4B_r}{\pi} \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \left[\frac{1}{n} \frac{\sinh\left(\frac{n\pi}{\tau}\right)h_M}{\sinh\left(\frac{n\pi}{\tau}\right)(h_M+\delta)} \sin\left(\frac{n\pi}{\tau}\alpha\right) \right], \quad (3)$$

где h_M — высота магнита; δ — размер приведенного рабочего зазора; τ — полюсное деление; $\alpha = b_M / \tau$ — конструктивный коэффициент полюсного перекрытия (b_M — ширина магнита).

Получены также выражения для расчетных коэффициентов поля реакции якоря:

$$k_{ad} = k_{aq} = \frac{\pi}{\tau} \delta \coth\left(\frac{\pi}{\tau}(h_M + \delta)\right). \quad (4)$$

Индуктивные параметры X_{ad} и X_{aq} для синхронных генераторов с радиально намагниченными магнитами и немагнитным бандажом при этом равны и вычисляются по формуле:

$$X_{ad} = X_{aq} = \frac{4m\mu_0}{p} l_{\delta} (w_{\phi} k_o)^2 f \coth\left(\frac{\pi}{\tau}(h_M + \delta)\right). \quad (5)$$

Для других конструктивных схем активных зон синхронных машин с постоянными магнитами

системы расчетных коэффициентов определены в [10, 11].

Существенные особенности расчетных коэффициентов в генераторах с постоянными магнитами обусловлены характером распределения магнитных полей в их активных зонах. Геометрические размеры и параметры генератора, полученные на базе расчетных коэффициентов, должны быть подтверждены численным экспериментом на основе конечно-элементного анализа.

Конструкции роторов авиационных генераторов с постоянными магнитами. Конструктивные схемы генераторов с постоянными магнитами обусловлены конструкцией их роторов [12]. Постоянные магниты на роторе крепятся с помощью бандажей; разработано множество конструктивных схем бандажей. Весьма перспективно применение немагнитных и биметаллических обойм, а также использование градиентного материала с немагнитными и магнитными участками. Они могут выполняться как массивными, так и шихтованными для снижения потерь. Биметаллические обоймы и обоймы из градиентного материала обеспечивают минимальный немагнитный зазор генератора, но при этом возрастают коэффициент рассеяния k_{σ} , главное индуктивное сопротивление по поперечной оси X_{aq} и МДС продольной реакции якоря F_{ad} .

В роторах с немагнитной цилиндрической обоймой используются, как правило, постоянные магниты радиальной намагниченности. К достоинствам рассматриваемых схем роторов относятся простота конструкции, технологичность, малая масса и большие допустимые механические нагрузки [13]. К недостаткам можно отнести увеличенный немагнитный зазор между магнитом и ферромагнитной поверхностью статора, повышенное по сравнению с другими типами обойм увеличение наружного диаметра ротора при нагружении центробежными силами.

В конструкции на рис. 6,а немагнитная обойма представляет собой сплошной цилиндр с боковыми фланцами, в который на клей устанавливаются постоянные магниты. Затем обойма с установленными в нее магнитами напрессовывается на вал, являющийся в данной конструкции ярмом. При высоких значениях частоты вращения ротора торцевые части обоймы разгружают ее тонкостенную часть, охватывающую цилиндрическую часть постоянных магнитов, позволяя лучше использовать прочностные характеристики обоймы. Другой разновидностью немагнитной цилиндрической обоймы является шихтованная обойма (рис. 6,б). В данной конструкции немагнитная обойма представляет собой набор отдельных немагнитных кольцевых пластин, которые стягиваются на валу гайками в осевом направлении.

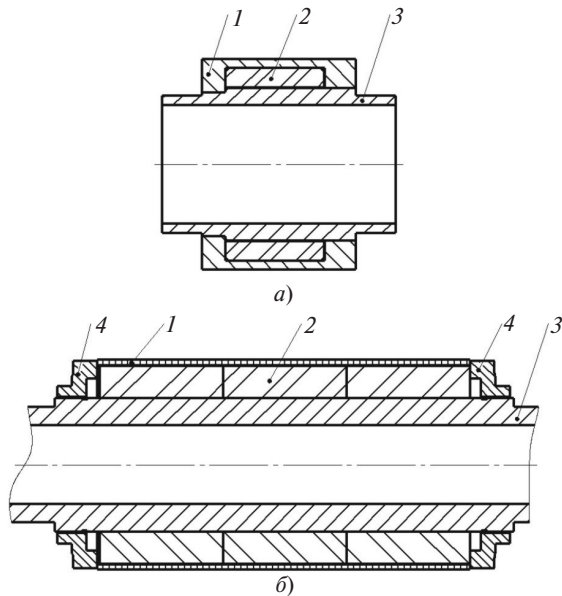


Рис. 6. Конструктивные схемы ротора с радиально намагниченными постоянными магнитами и немагнитной обоймой: *a* – схема с массивной обоймой; *б* – схема с шихтованной обоймой; 1 – немагнитная обойма; 2 – постоянный магнит; 3 – вал (ядро индуктора); 4 – стягивающая гайка

Применение немагнитных обойм увеличивает немагнитный зазор между постоянными магнитами и ферромагнитной поверхностью якоря. Однако для генераторов с постоянными магнитами это не приводит к существенному увеличению общего сопротивления магнитной цепи, так как магнитное сопротивление рабочего зазора вместе с сопротивлением немагнитного банджа много меньше, чем сопротивление самого постоянного магнита. Так, анализ магнитного поля в рабочем зазоре генератора при зазоре в 1 мм без банджа и с банджом толщиной 2 мм, выполненный на основании формулы (3), показывает, что увеличение немагнитного зазора втрое уменьшает максимальную индукцию в зазоре всего на 15–20%. Это обусловлено большим магнитным сопротивлением магнита R_M .

Таким образом, использование немагнитной обоймы, а также увеличение коэффициента насыщения магнитной цепи не приводят к заметному ослаблению магнитного потока в зазоре. Кроме того, из-за большого значения R_M и технологическая неравномерность рабочего зазора мало влияет на значение индукции под полюсами, поэтому усилия магнитного притяжения в генераторах с постоянными магнитами существенно меньше, чем при электромагнитном возбуждении.

На рис. 7,*a* представлен эскиз ротора с радиально намагниченными постоянными магнитами и слоистой магнитно-немагнитной обоймой [14]. В такой обойме магнитные участки в осевом направлении чередуются с немагнитными. Магнитные участки образованы зубцами полюсных наконечников над постоянными магнитами и стальными листами

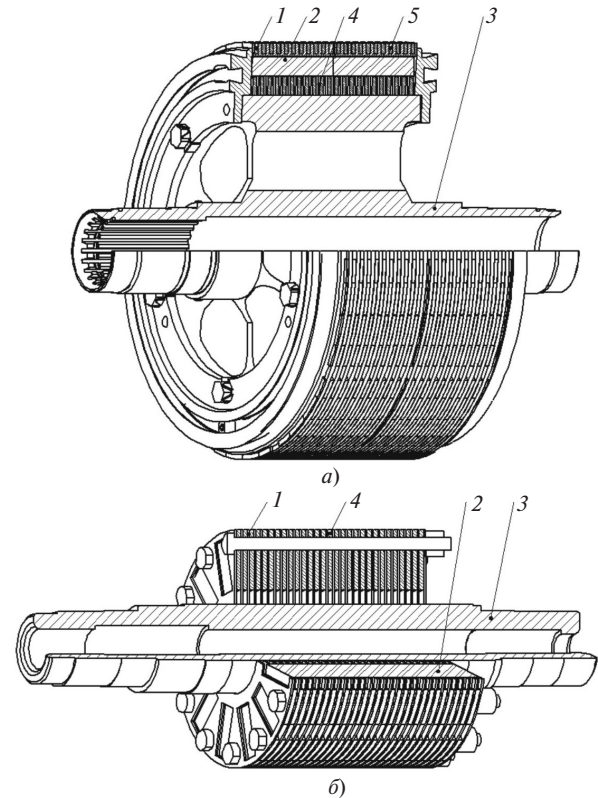


Рис. 7. Конструктивные схемы ротора со слоистой магнитно-немагнитной обоймой: *a* – ротор с радиально намагниченными магнитами; *б* – ротор с тангенциально намагниченными магнитами; 1 – полюсный наконечник; 2 – постоянный магнит; 3 – вал; 4 – немагнитная кольцевая пластина (силовой элемент)

под постоянными магнитами. В пазах полюсных наконечников проходят титановые листы, являющиеся силовыми элементами, удерживающими на роторе постоянные магниты и полюсные наконечники. Магнитные и немагнитные участки фиксируются на валу от осевого перемещения с помощью фланцев.

На рис. 7,*б* представлен эскиз ротора с тангенциально намагниченными постоянными магнитами и слоистой магнитно-немагнитной обоймой [15]. Отличие рассматриваемой конструкции от предыдущей состоит в том, что полюсные наконечники располагаются между магнитами и удерживаются винтами, проходящими через отверстия в титановых листах. Титановые листы удерживают винты и постоянные магниты. Прочность ротора определяется отношением толщины силового элемента к толщине магнитного полюса.

Достоинством конструктивных схем роторов на рис. 7 являются уменьшенный немагнитный зазор по сравнению с роторами, имеющими немагнитную цилиндрическую обойму, более эффективное использование объема ротора. К недостаткам можно отнести неравномерность распределения магнитного поля в осевом направлении ротора, сложность конструкции и технологии сборки, а также увеличение массы за счет использования дополнительных ферромагнитных элементов.

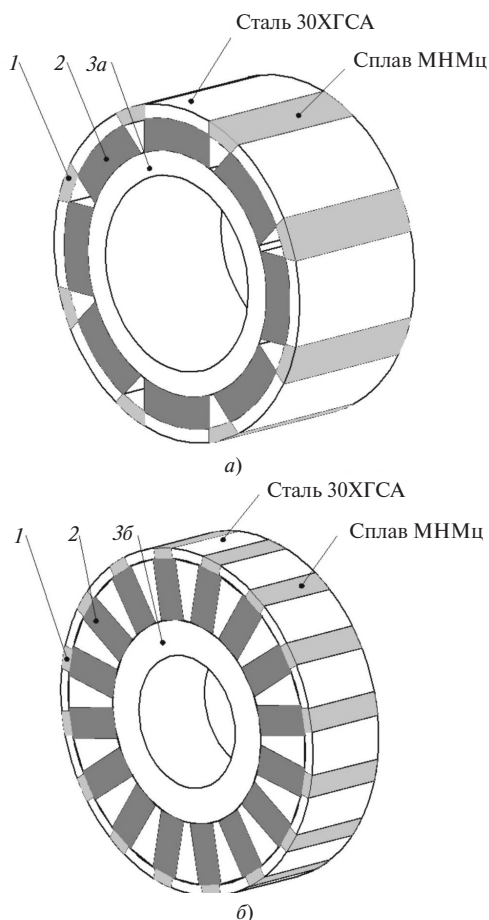


Рис. 8. Конструктивные схемы ротора с биметаллической обоймой: *а* – ротор с радиально намагниченными магнитами; *б* – ротор с тангенциально намагниченными магнитами; 1 – немагнитный участок биметаллической обоймы; 2 – постоянный магнит; 3а – магнитный вал; 3б – немагнитный вал

На рис. 8,*а* представлен эскиз магнитной системы ротора с радиально намагниченными постоянными магнитами и биметаллической обоймой. В рассматриваемой конструкции обойма состоит из чередующихся зон магнитного и немагнитного металлов, соединяемых методом намораживания. Одним из металлов является магнитная сталь, которая выполняет роль полюсного наконечника, другим – медно-никелевый сплав, который образует немагнитные зоны между полюсными наконечниками. В такой конструкции магнитная зона располагается над магнитом. На рис. 8,*б* представлен эскиз магнитной системы ротора с тангенциально намагниченными постоянными магнитами и биметаллической обоймой. Отличием от предыдущей схемы является расположение полюсного наконечника между магнитами.

Достоинством конструктивных схем роторов с биметаллической обоймой является простота конструкции и равенство немагнитного и рабочего зазоров. К недостаткам следует отнести сложную технологию намораживания магнитного и немагнитного металлов.

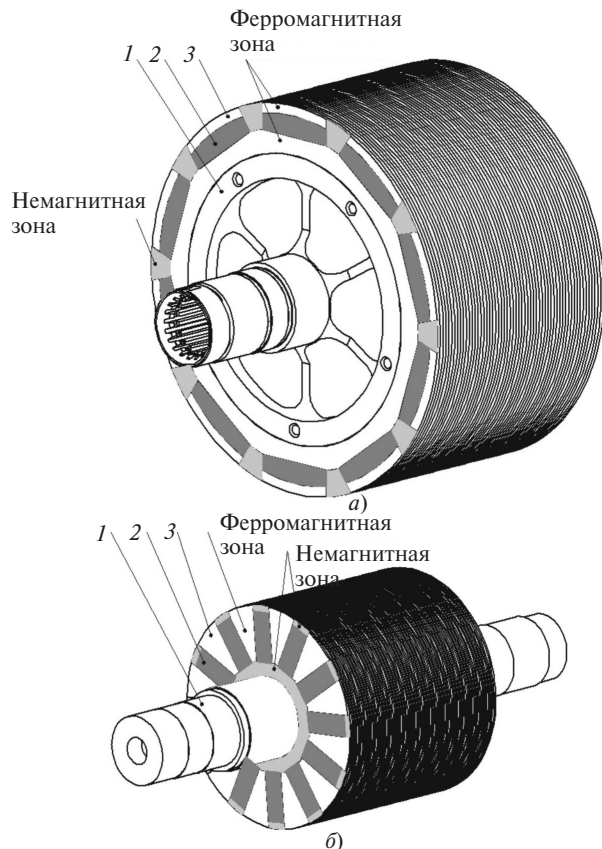


Рис. 9. Конструктивные схемы ротора с обоймой из градиентного материала: *а* – ротор с радиально намагниченными магнитами; *б* – ротор с тангенциально намагниченными магнитами; 1 – вал; 2 – постоянный магнит; 3 – листы из градиентного материала

На рис. 9,*а* представлен эскиз магнитной системы ротора с радиально намагниченными постоянными магнитами и обоймой из градиентного материала [16]. В рассматриваемой конструкции обойма представляет собой набор кольцевых пластин, стянутых в осевом направлении. Пластины изготовлены из специального магнитного материала, в котором путем точечной термической обработки образуют немагнитные зоны необходимой геометрии. Обойма из градиентного материала в электромагнитном отношении является одним из вариантов биметаллической обоймы. Обойма из градиентного материала позволяет существенно разгрузить кольцевую часть обоймы над магнитами за счет наличия немагнитных участков между магнитами, переносящими механические нагрузки на ярмо индуктора. При этом механическая прочность ротора возрастает в несколько раз. Это особенно важно для генераторов повышенной мощности. Выбор рациональных соотношений геометрических размеров магнитных и немагнитных частей обоймы представляет собой частную оптимизационную задачу необходимой и достаточной прочности ротора при его минимальной массе.

На рис. 9,*б* представлен эскиз магнитной системы ротора с тангенциальными магнитами [16].

Наименование параметра	Значение	Наименование параметра	Значение
<i>Основные геометрические параметры</i>		<i>Номинальный режим при 8000 об/мин</i>	
Число пар полюсов	8	Фазное напряжение, В	120
Внутренний диаметр статора, мм	170	Частота напряжения, Гц	1067
Активная осевая дина, мм	460	Линейная нагрузка якоря, А/см	624
Конструктивный коэффициент	2,7	Плотность тока в обмотке, А/мм ²	20
Рабочий зазор, мм	1,5	Индукция в рабочем зазоре, Тл	0,67
Число зубцов (пазов) статора	48	Относительное значение ЭДС	1,132
Число эффективных проводников в пазу статора	2	Потери в обмотке, кВт	9,9
Относительная высота паза	1,75	Потери в стали, кВт	6,5
Толщина титановой обоймы, мм	4	КПД генератора	0,966
Высота постоянного магнита, мм	15	<i>Результаты расчета массы</i>	
Наружный диаметр статора, мм	206	Масса пакета якоря, кг	22,6
Максимальная окружная скорость ротора, м/с	140	Масса обмотки якоря, кг	8,7
Максимальное механическое напряжение в обойме, МПа	610	Масса постоянных магнитов, кг	21,1
<i>Параметры обмотки при 8000 об/мин</i>		Масса немагнитной обоймы, кг	4,3
Активное сопротивление фазы при 180 °С, мОм	1,7	Масса активных материалов генератора, кг	56,7
Индуктивное сопротивление рассеяния фазы, мОм	23,5	Оценочная суммарная масса генератора, кг	110
Главное индуктивное сопротивление реакции якоря, мОм	15,2	Удельная масса генератора, кг/кВА	0,22

Достоинством представленных на рис. 9 конструктивных схем являются повышенные допустимые механические нагрузки, более эффективное использование объема ротора и равенство немагнитного и рабочего зазоров между статором и ротором. К недостаткам следует отнести повышенную трудоемкость изготовления и высокую стоимость роторов.

Из рассмотрения схем следует, что конструкции роторов с постоянными магнитами существенно проще, чем конструкции роторов с обмотками возбуждения и вращающимся выпрямителем. Кроме того, при использовании постоянных магнитов отсутствуют потери на возбуждение.

Наиболее простой и достаточно эффективной из рассмотренных является конструкция ротора с немагнитным бандажом.

Преимущество бандажа из градиентного материала состоит в том, что ярмо индуктора воспринимает значительную часть центробежных усилий при вращении генератора и обеспечивает его повышенную механическую прочность.

Одним из недостатков генераторов с постоянными магнитами является трудность устранения внутреннего короткого замыкания части обмотки якоря, хотя в генераторе используется устройство отключения от привода при нарушении работы подшипниковых узлов. Для уменьшения возможности короткого замыкания части обмотки якоря можно использовать катушечную обмотку якоря с числом пазов на полюс и фазу, меньшим единицы.

Это позволяет улучшить технологию изготовления обмотки якоря и увеличить ее электрическую прочность.

В таблице представлены результаты варианта расчета трехфазного генератора с радиальными постоянными магнитами и немагнитной (титановой) обоймой мощностью 500 кВА и частотой вращения 8000÷16000 об/мин с масляной системой охлаждения, предназначенного для работы совместно с управляемыми выпрямителями в СЭС постоянного тока 270 В.

Выводы 1. Высокооборотные авиационные генераторы с постоянными магнитами обладают более высокой механической прочностью и критической частотой вращения, чем генераторы с электромагнитным возбуждением, и при непосредственном приводе от авиадвигателя и переменной частоте вращения при мощности 500 кВА и более могут рассматриваться как альтернативные генераторам с электромагнитным возбуждением.

2. Наиболее рационально использование многофазных и многополюсных генераторов с постоянными магнитами в системах генерирования постоянного тока повышенного напряжения и переменного тока стабильной частоты в системе с электронными преобразователями.

3. Генераторы с радиальными магнитами обладают более прочным ротором и могут быть выполнены на большие значения мощности и частоты вращения, чем генераторы с тангенциальными магнитами.

4. Роторы с тангенциальными магнитами обеспечивают более высокие значения магнитной индукции в рабочем зазоре, чем с радиальными магнитами, и позволяют снизить длину высокооборотных генераторов при практически одинаковой их массе.

5. Конструктивно наиболее простой и достаточно эффективной является конструкция ротора с немагнитным бандажом. Преимущество бандажа из градиентного материала состоит в его повышенной механической прочности.

6. Наиболее рационально использование генераторов с постоянными магнитами во вспомогательных авиационных системах генерирования, в которых частота вращения может регулироваться подачей топлива в камеры сгорания.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17-19-01269).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Науменко В.И., Клочков О.Г. Авиационные электрические машины с интенсивным охлаждением. — М: Машиностроение, 1977.
2. Пат. РФ № 2523018. Статор электрической машины/А.В. Левин, В.М. Довгаленок, С.В. Журавлев, Р.Ю. Мисютин, В.А. Хабаров. — БИ, 2014, № 20.
3. Пат. РФ № 2546964. Статор электрической машины с жидкостным охлаждением проточным хладагентом/С.В. Журавлев, Р.Ю. Мисютин, А.В. Левин, В.М. Довгаленок. — БИ, 2015, № 10.
4. Кузьмичев Р.В., Левин Д.В., Мисютин Р.Ю., Зечихин Б.С. Авиационные генераторы повышенной мощности. — Вестник Московского авиационного института, 2011, т. 18, № 6, с. 39–46.
5. Мисютин Р.Ю., Левин А.В., Журавлев С.В., Зечихин Б.С. Автоматизированное конструирование авиационных электрических генераторов с постоянными магнитами. — Вестник Московского авиационного института, 2013, т. 20, № 2, с. 132–139.
6. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: Учебник для вузов. — М.: Энергия, 1980, 928 с.
7. Журавлев С.В., Зечихин Б.С. Автоматизированный расчет авиационного синхронного генератора: Учебное пособие к курсовому и дипломному проектированию. — М.: Изд-во Московского авиационного института, 2011, 60 с.
8. Зечихин Б.С., Куприянов А.Д., Сыроежкин Е.В. Традиционные и компьютерные методы проектирования бесконтактных синхронных машин. — Электричество, 2002, № 5, с. 61–71.

9. Зечихин Б.С. Электрические машины летательных аппаратов. Гармонический анализ активных зон. — М.: Машиностроение, 1983, 149 с.

10. Зечихин Б.С., Журавлев С.В., Ситин Д.А. Расчетные коэффициенты синхронных машин с редкоземельными магнитами. — Электричество, 2009, № 3, с. 35–40.

11. Журавлев С.В., Зечихин Б.С., Кузьмичев Р.В. Аналитический расчет магнитного поля в активной зоне синхронных машин с постоянными магнитами. — Вестник Московского авиационного института, 2016, т. 23, № 1, с. 197–209.

12. Мисютин Р.Ю. Автоматизированное конструирование авиационных генераторов с постоянными магнитами: Автореф. дисс.... канд. техн. наук. — Москва, 2015, 35 с.

13. Пат. РФ № 2516440. Ротор электрической машины/С.В. Журавлев, А.В. Левин, Р.Ю. Мисютин, Д.А. Ситин, Ф.А. Фокин, В.А. Хабаров. — БИ, 2014, № 1

14. Пат. РФ № 2211517. Ротор электрической машины/А.В. Левин, Э.Я. Лившиц, В.А. Хабаров. — БИ, 2003, № 24.

15. Пат. РФ № 66603. Ротор высокооборотной электрической машины/А.В. Левин, Э.Я. Лившиц, В.А. Хабаров, М.М. Юхнин. — БИ, 2007, № 25.

16. Пат. РФ № 2382472. Ротор высокооборотной электрической машины/А.В. Левин, Э.Я. Лившиц, В.А. Хабаров, М.М. Юхнин. — БИ, 2010, № 5.

[10.01.2018]

А в т о р ы: Зечихин Борис Семенович окончил Московский авиационный институт (МАИ) в 1955 г. Защитил докторскую диссертацию «Основы теории и методы расчета активных зон синхронных машин летательных аппаратов на базе гармонического анализа магнитных полей» в 1983 г. Профессор кафедры «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» МАИ.

Журавлев Сергей Владимирович окончил МАИ в 2002 г. Защитил кандидатскую диссертацию «Линейные синхронные двигатели с редкоземельными постоянными магнитами» в 2005 г. Доцент кафедры «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» МАИ.

Мисютин Роман Юрьевич окончил МАИ в 2011 г. Защитил кандидатскую диссертацию «Автоматизированное конструирование авиационных генераторов с постоянными магнитами» в 2015 г. Начальник Конструкторского отдела электрических машин Департамента систем электроснабжения Центра проектирования АО «Технодинамика».

Elektrichestvo, 2018, No. 6, pp. 49–59

DOI:10.24160/0013-5380-2018-6-49-59

Permanent-Magnet Generators for Aircraft Applications

ZECHIKHIN Boris S. (Moscow Aviation Institute (MAI), Moscow, Russia) — Professor, Dr. Sci. (Eng.)

ZHURAVLEV Sergey V. (MAI, Moscow, Russia) — Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

MISYUTIN Roman Yu. (JSC «Technodinamika», Moscow, Russia) — Head of the Electrical Machines Design Department, Cand. Sci. (Eng.)

The capacity of aircraft generators reaches several hundred kVA. For decreasing their specific mass, the generators are designed for limiting rotation frequencies in terms of strength considerations. With increasing the capacity of aircraft generators, their excitation system on the basis of high-energy permanent magnets can be regarded as an alternative to the electromagnetic excitation system. This is because the volume of magnets is several times smaller than that of ferromagnetic poles with windings. Therefore, permanent-magnet generators can be made with a rotor having a smaller mass and a shaft diameter several

times larger than in a generator with electromagnetic excitation, due to which it becomes possible to increase their critical frequency and limit power capacity. In addition a rotor with permanent magnets has a higher strength and can be designed for higher rotation frequencies and for a larger number of poles than in case of using electromagnetic excitation. Permanent-magnet generators have higher efficiency values and higher overloading ratios. Rotors fitted with tangential magnets produce higher magnetic induction values in the air gap than the rotors fitted with radial magnets, due to which it becomes possible to make a high-frequency generator with a shorter length while keeping its mass almost unchanged. On the other hand, generators fitted with radial magnets have a stronger rotor and can be designed for higher capacities and rotation frequencies than generators with tangential magnets. Among many design arrangements of rotors, those with nonmagnetic yokes are the simplest ones, whereas arrangements with yokes made of gradient material are the most efficient ones. The most rational application of multipole permanent-magnet generators is in DC systems involving electronic converters.

Key words: aircraft generator, permanent-magnet generator, permanent magnet mathematical model, rotor design arrangement, nonmagnetic yoke, bimetallic yoke, yoke made of gradient material

REFERENCES

1. Naumenko V.I., Klochkov O.G. *Aviatsionnye elektricheskiye mashiny s intensivnym okhlazhdeniyem* (Aviation electrical machines with intensive cooling). Moscow, Publ. «Mashinostroyeniye», 1977.
2. Patent RF No. 2523018. *Stator elektricheskoi mashiny* (RF Patent No. 2523018. The Stator of an Electrical Machine)/ A.V. Levin, V.M. Dovgalenok, S.V. Zhuravlev, R.Yu. Misyutin, V.A. Khabarov. Bulletin of inventions, 2014, No. 20.
3. Patent RF No. 2546964. *Stator elektricheskoi mashiny s zhidkostnym okhlazhdeniyem protochnym khladagentom* (RF Patent No. 2546964. An Electrical Machine Stator with Liquid Cooling by Flow-type Refrigerant)/S.V. Zhuravlev, R.Yu. Misyutin, A.V. Levin, V.M. Dovgalenok. Bulletin of inventions, 2015, No. 10.
4. Kuz'michev R.V., Levin A.V., Misyutin R.Yu., Zechikhin B.S. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta – in Russ. (Bulletin of Moscow Aviation Institute)*, 2011, vol. 18, No. 6, pp. 39–46.
5. Misyutin R.Yu., Levin A.V., Zhuravlev S.V., Zechikhin B.S. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta – in Russ. (Bulletin of Moscow Aviation Institute)*, 2013, vol. 20, No. 2, pp. 132–139.
6. Ivanov-Smolenskii A.V. *Elektricheskiye mashiny: Uchebnik dlya vuzov* (Electrical machines: Textbook for Higher education institutions). Moscow, Publ. «Energiya», 1980, 928 p.
7. Zhuravlev S.V., Zechikhin B.S. *Avtomatizirovannyi raschet aviatsionnogo sinkhronnogo generatora: Uchebnoye pos. k kursovomu i diplomnomu proyektirovaniyu* (Automated design calculation of aviation synchronous generator). Moscow Aviation Institute, 2011, 60 p.
8. Zechikhin B.S., Kupriyanov A.D., Syroezhkin Ye.V. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2002, No. 5, pp. 61–71.
9. Zechikhin B.S. *Elektricheskiye mashiny letatel'nykh apparatov. Garmonicheskii analiz aktivnykh zon* (Electrical machines of aircrafts. Harmonic analysis of active zones). Moscow, Publ. «Mashinostroyeniye», 1983, 149 p.
10. Zechikhin B.S., Zhuravlev S.V., Sitin D.A. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2009, No. 3, pp. 35–40.
11. Zhuravlev S.V., Zechikhin B.S., Kuz'michev R.V. *Vestnik Moskovskogo Aviatsionnogo instituta – in Russ. (Bulletin of Moscow Aviation Institute)*, 2016, vol. 23, No. 1, pp. 197–209.
12. Misyutin R.Yu. *Avtomatizirovannoye konstruirovaniye aviatsionnykh generatorov s postoyannymi magnitami: Avtoref. diss. ...kand. tekhn. nauk* (Automated Design of Aviation Generators with Permanent Magnets: Authors Abstract of Cand. Sci. (Eng.)). Moscow, 2015, 35 p.
13. Patent RF No. 2516440. *Rotor elektricheskoi mashiny* (RF Patent No. 2516440. The Rotor of an Electrical Machine)/S.V. Zhuravlev, A.V. Levin, R.Yu. Misyutin, D.A. Sitin, F.A. Fokin, V.A. Khabarov. Bulletin of inventions, 2014, No. 14.
14. Patent RU 2211517. *Rotor elektricheskoi mashiny* (RF Patent No. 2211517. The Rotor of an Electrical Machine)/A.V. Levin, E.Ya. Livshits, V.A. Khabarov. Bulletin of inventions, 2003, No. 24.
15. Patent RU 66603. *Rotor vysokooborotnoi elektricheskoi mashiny* (RF Patent No. 66603. The Rotor of High-Speed Electrical Machine)/A.V. Levin, E. Ya. Livshits, V.A. Khabarov, M.M. Yukhnin. – Bulletin of inventions, 2007, No. 25.
16. Patent RU 2382472. *Rotor vysokooborotnoi elektricheskoi mashiny* (RF Patent No. 2382472. The Rotor of a High-Speed Electrical Machine)/A.V. Levin, E.Ya. Livshits, V.A. Khabarov, M.M. Yukhnin. Bulletin of inventions, 2010, No. 5.

[10.01.2018]