

Проектирование высокооборотных генераторов большой мощности с постоянными магнитами на роторе

СМИРНОВ А.Ю.

Для обеспечения все возрастающего уровня энергопотребления не последняя роль отводится разработке и созданию генераторов с высококоэрцитивными постоянными магнитами на основе сплавов редкоземельных материалов. В статье описан подход к проектированию мощных генераторов с постоянными магнитами, большие значения единичной мощности которых достигаются за счёт высокой частоты вращения. Представлен алгоритм и приведен пример проектирования, в которых основные размеры генератора – диаметр рашотки и длина зазора – определяются не только исходя из электромагнитных нагрузок (линейной и индукции в зазоре), но и с учётом механической прочности ротора, оцениваемой по предельно допустимой линейной скорости ротора на его наружной поверхности, прочности скрепляющей оболочки из неферромагнитного материала, охватывающей магниты по внешней цилиндрической поверхности. Приведены расчётный способ проверки устойчивости магнитов спроектированного генератора к размагничиванию и показаны особенности расчёта угловых и внешних характеристик магнитоэлектрического генератора при проведении поверочных расчётов с использованием сеточной модели и векторной диаграммы.

Ключевые слова: высокооборотный генератор, постоянные магниты, линейная нагрузка, скрепляющая оболочка, ударный ток короткого замыкания, угловая характеристика, внешняя характеристика

Развитие электротехнических комплексов различного назначения, объектов автономной энергетики и транспортного машиностроения обусловили интерес к созданию компактных генераторов большой единичной мощности для обеспечения всё возрастающего уровня энергопотребления.

Не последняя роль в решении этой проблемы отводится разработке генераторов с высококоэрцитивными постоянными магнитами на основе сплавов редкоземельных металлов (РЗМ) — самария или неодима [1]. Имеются сведения о проектирова-

нии в России и за рубежом магнитоэлектрических генераторов единичной мощностью 10 МВт и более.

Единственным путём повышения установленной единичной мощности машины в условиях ограничения габаритов является максимально возможное увеличение номинальной частоты вращения ротора при поддержании высокого уровня электромагнитных нагрузок. Важная конструктивная особенность высокооборотных машин — наличие скрепляющей оболочки 1 из неферромагнитного материала высокой прочности, охватывающей магниты по внешней цилиндрической поверхности (рис. 1). Магниты представлены сегментами 2 из магнитотвёрдого материала, намагниченными в радиальном направлении. Они охватывают ярмо ротора на протяжении 0,75–0,8 длины полюсного деления. Силовые сегменты 3 из неферромагнитного материала в междуполюсном пространстве ротора служат для жёсткой посадки скрепляющей оболочки и отчасти для передачи приложенного к валу вращающего момента.

Ввиду отсутствия полюсных наконечников и весьма низкой магнитной проницаемости материала высококоэрцитивных постоянных магнитов данную конструкцию ротора синхронной машины следует охарактеризовать как неявнополюсную.

Указанные особенности накладывают серьёзные ограничения при определении основных размеров

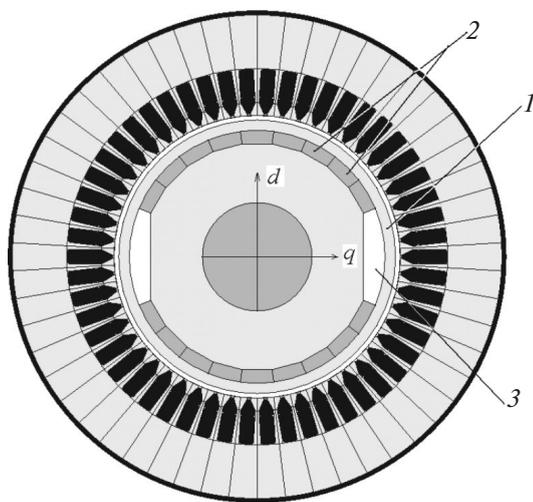


Рис. 1. Схема конструкции магнитной цепи высокооборотного генератора: 1 — скрепляющая оболочка из неферромагнитного материала; 2 — магниты; 3 — силовые сегменты

и конструктивных соотношений таких магнитных систем, требуется учесть следующие факторы:

наличие большого немагнитного зазора между статором и ротором, обусловленного внедрением в него толстостенной скрепляющей оболочки;

необходимость обеспечения устойчивости магнитов к размагничиванию на случаи воздействия ударных токов короткого замыкания;

ограничение по внешнему диаметру ротора, обусловленное необходимостью обеспечения его механической прочности в виде предельно допустимого значения линейной скорости на внешней цилиндрической поверхности ротора; записывается в виде условия

$$\frac{\pi D_p n}{60} < V_{кр}, \quad (1)$$

где D_p – наружный диаметр ротора по скрепляющей оболочке; n – синхронная или угонная частота вращения ротора генератора, об/мин; $V_{кр}$ – критическая линейная скорость движения точек внешней цилиндрической поверхности ротора генератора, $V_{кр} = 200–220$ м/с в зависимости от толщины и материала скрепляющей оболочки. Диаметр ротора при этом меньше расточки статора на двойной размер воздушного зазора δ между поверхностью расточки статора и внешней поверхностью оболочки ротора:

$$D_p = D_S = 2\delta. \quad (2)$$

Его значение тесно увязывается с условиями теплосъёма с проводов обмотки, подавления высших гармоник и предохранения магнитов от перегрева в результате теплопередачи.

Для определения диаметра расточки статора D_S выражаем первую гармонику результирующей МДС, созданной током всех трёх фаз, через параметры обмотки [2]:

$$F_1 = 1,35 \frac{w_\phi I_{ном} K_{об}}{p}, \quad (3)$$

где w_ϕ – число витков фазы; $K_{об}$ – обмоточный коэффициент; p – число пар полюсов. Подставляя сюда МДС из уравнения для линейной нагрузки [3]

$$A = \frac{2mw_\phi I_{ном}}{\pi D_S}, \quad (4)$$

где $m=3$ для трёхфазной обмотки, найдём

$$D_S = \frac{2mF_1 p}{1,35\pi K_{об} A} = 1,414 \frac{F_1 p}{K_{об} A}. \quad (5)$$

Полученное значение проверяется на выполнение критерия (1) прочности ротора. В случае его

невыполнения потребуется увеличить линейную нагрузку A . Рекомендуемые пределы её варьирования 50000–130000 А/м. Большие значения относятся к машинам с непосредственным охлаждением активных частей путём прокачивания охлаждающей жидкости (воды) через магнитопровод статора или его пазы с обмоткой. Меньшие значения относятся к машинам с комбинированным воздушно-водяным охлаждением.

Значение индукции в зазоре предварительно можно принять примерно 0,75–0,8 Тл с последующим уточнением по схеме замещения ненасыщенной машины, представленной магнитными проводимостями зазора, магнитов и МДС магнитов.

Длину ротора и пакета статора машины в аксиальном направлении выделяем из уравнений машинной постоянной (Арнольда) [3, 4]:

$$\frac{D_S^2 l_\delta \pi n}{S_p 30} = \frac{2}{\pi \alpha_\delta K_{об} B_\delta A}, \quad (6)$$

где расчётная полная мощность

$$S_p = \frac{k_E P}{\cos \varphi}; \quad (7)$$

k_E – отношение ЭДС фазы к напряжению в номинальном режиме ($k_E = 1,07 \div 1,15$); $\alpha_\delta = 0,8$ – коэффициент полюсного перекрытия.

С учётом (7) и численных значений коэффициентов из (6) выражается осевая длина статора и ротора:

$$l_\delta = \frac{8,43P}{K_{об} n D_S^2 B_\delta A \cos \varphi}. \quad (8)$$

Может оказаться, что отношение этого размера к диаметру расточки D_S превысит диапазон технологически рациональных значений

$$\lambda = l_\delta / D_S \leq 5 \div 7, \quad (9)$$

тогда потребуется выбрать большие значения электромагнитных нагрузок, что на этапе определения размеров ротора (рассматривается далее), возможно, потребует использования магнитотвёрдого материала с более высокими значениями H_{cb} и B_r .

Далее по известным методикам проектирования машин переменного тока [4, 5] определяется наружный диаметр статора $D_{нар}$. Для двухполюсных машин его значение, как правило, оказывается в пределах

$$D_S = (0,52 \div 0,57) D_{нар}. \quad (10)$$

В соответствии с этими же методиками выбирается число зубцов на основе предельно допустимых относительных значений длины зубцового деления,

рассчитываются обмотки с выбором размеров провода, параметров геометрии катушек и катушечных групп, определением числа витков фазы. Составляется спецификация паза с расчётом заполнения его по высоте проводами и изоляцией.

Серьёзной проблемой высокооборотных машин с постоянными магнитами является повторное намагничивание магнитов в случае их размагничивания под влиянием нагрева или под действием поля якоря. В силу особенностей конструкции такая авария способна привести к невозможности потери функциональных качеств ротора и длительному выводу генератора из эксплуатации. По этой причине, а также из-за высокой стоимости РЗМ материалов постоянных магнитов устойчивость к воздействию полей якоря под влиянием очень больших токов переходных режимов принимает особую значимость.

Ряд авторов решают её увеличением объёма установленных магнитов пропорционально следующей функции кратности тока короткого замыкания [6, 7]:

$$K_V = \frac{K_I^2}{K_I - 1}, \quad (11)$$

где $K_I = \frac{I_k}{I_{ном}}$, I_k — ток короткого замыкания;

$I_{ном}$ — номинальный ток фазы, рекомендуется $K_I = 2$. Легко оценить, что использование (11) приведёт к четырёхкратному увеличению общего объёма установленных на роторе магнитов, что вряд ли целесообразно по экономическим соображениям.

В машинах с использованием дорогих магнитотвёрдых материалов для обеспечения их устойчивости к размагничиванию под воздействием поля якоря менее затратным является увеличение длины магнитов в направлении намагничивания пропорционально ударному току короткого замыкания. В пренебрежении сверхпереходными составляющими его нормализованное значение можно принять равным [2]:

$$I_{уд} = 1,05 \cdot 1,8 \sqrt{2} \frac{U_{ном}}{X'_d}. \quad (12)$$

Формула является приближённой, так как не учитывает влияния токов, наведённых в массивных проводящих частях ротора.

Для проверки устойчивости магнитов к размагничиванию достаточно убедиться, что МДС обмотки якоря, приложенная к ним при воздействии ударного тока короткого замыкания (рис. 2), отнесённая к длине магнита, не превышает значения коэрцитивной силы по характеристике (прямой —

для магнитов из РЗМ) размагничивания по индукции H_{cb} :

$$H_{cb} \geq \frac{F_{уд}}{h_M}, \quad (13)$$

где h_M — длина магнита в направлении намагничивания; $F_{уд}$ — МДС обмотки при ударном токе короткого замыкания, вычисленная подстановкой (12) в (3) вместо номинального значения $I_{ном}$, причём можно обосновать подстановку МДС как для симметричного трёхфазного короткого замыкания, так и для однофазного, уменьшив в последнем случае значение $F_{уд}$ в 1,5 раза.

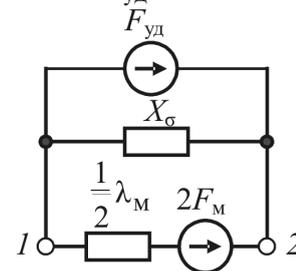


Рис. 2. Схема замещения генератора в режиме короткого замыкания

В качестве переходного индуктивного сопротивления X'_d возможно рассматривать сопротивление рассеяния фазы обмотки:

$$X'_d = X_\sigma = 4\pi f \mu_0 \frac{w_\Phi^2}{pq} I_\delta (\lambda_\Pi + \lambda_\Delta), \quad (14)$$

где μ_0 — магнитная постоянная; q — число пазов на полюс и фазу обмотки якоря; λ_Π и λ_Δ — коэффициенты магнитной проводимости пазового и лобового рассеяния (вычисляются после определения параметров обмотки, геометрии пазов и длины вылета лобовых частей, проводимость дифференциального рассеяния можно не учитывать). Порядок значений индуктивного сопротивления рассеяния низковольтного генератора с номинальным фазным напряжением 380 В, частотой вращения 25000—30000 об/мин и мощностью 1500 МВт составляет одну-две десятых долей Ома (0,1÷0,2 Ом) при сопоставимом, несколько большем, значении главного индуктивного сопротивления фазы.

Из (13) выражается длина магнита h_M подстановкой найденного значения МДС с небольшим запасом на превышение над МДС обмотки:

$$h_M = (1,03 \div 1,06) \frac{F_{уд}}{H_{cb}}. \quad (15)$$

Остаётся уточнить значение индукции в зазоре и откорректировать его в случае существенного отличия от первоначально принятого. Для этого, пренебрегая магнитным сопротивлением всех фер-

ромагнитных участков магнитной цепи, кроме постоянных магнитов, вычисляем индукцию в зазоре под серединами полюсов B_δ в режиме холостого хода:

$$B_\delta = \frac{h_M}{\delta + h_{об} + h_M} B_r, \quad (16)$$

где B_r – остаточная индукция магнитотвёрдого материала по характеристике размагничивания (паспортное значение), фиксируется для «горячего» состояния при температуре, под которую будет разработана система охлаждения; $h_{об}$ – радиальный размер скрепляющей оболочки ротора, вычисленный из прочностного расчёта.

При определении размера скрепляющей оболочки принимаем ротор состоящим из собственно оболочки в виде трубы и сплошного цилиндра из ферромагнитных материалов внутри неё. Центробежная сила, действующая на такую модель, будет представлена суммой двух составляющих:

$$F = (m_{об} + m_M) \left(\frac{\pi n}{30} \right)^2 \frac{D_p}{2} = \frac{\pi^3 n^2}{1800} \times \left[h_{об} (h_{об} - D_p) \rho_{об} + \frac{1}{4} (D_p - 2h_{об})^2 \rho_M \right] l_\delta D_p, \quad (17)$$

где $m_{об}$, m_M – масса оболочки ротора и его магнитопровода; $\rho_{об}$, ρ_M – их плотности, причём последняя переменная представляет собой усреднённое значение плотности магнитомягкой стали и постоянных магнитов. При использовании магнитов из сплавов Nd-Fe-B можно принять $\rho_M = 7600 \text{ кг·м}^3$, а при использовании самарий-кобальтовых магнитов $\rho_M = 8100 \text{ кг·м}^3$.

С учётом коэффициента запаса скрепляющая оболочка, которая воспринимает эту силу, должна обеспечивать значение среднего напряжения растяжения σ (МПа) не менее [8]:

$$\frac{\sigma}{1,7 \div 2,6} = \frac{F}{2\pi l_\delta h_{об} \cdot 10^6}. \quad (18)$$

Из совместного решения (17) и (18) путём исключения переменной F определяется $h_{об}$.

Пример расчёта с последовательностью вычислений при определении основных размеров мощного высокооборотного генератора представлен в таблице. Представленный алгоритм не требует особых средств вычисления и программного обеспечения.

Поверочный расчёт проводится в статическом режиме, в неподвижной относительно ротора системе координат (рис. 1).

Характеристики мощного генератора, рассчитанные методом конечных элементов, представле-

№ п/п	Наименование параметра, единицы измерения, источник (расчётная формула), [поз. в списке литературы]	Значение
Исходные данные		
1	Номинальная мощность P , кВт	4300
2	Номинальное линейное напряжение U , В	6000
3	Номинальная частота вращения ротора n , об/мин	12000
4	Магниты: коэрцитивная сила H_{cb} , кА/м остаточная индукция B_r , Тл	1050 1,25
5	Число пар полюсов p	1
6	Коэффициент мощности $\cos\varphi$	0,8
7	Число фаз m	3
8	Материал и прочность скрепляющей оболочки σ , МПа	Титан ВТ-0 1000
Результаты расчёта		
1	Номинальный ток фазы $I_{ном}$, А [2, 3]	517,2
2	Линейная нагрузка A , А/м [3, 4]	125000
3	Индукция в зазоре B_δ (предварительно), Тл [3–5]	0,80
4	Критическая линейная скорость $V_{кр}$, м/с	190
5	Диаметр ротора D_p , м (1)	0,302
6	Воздушный зазор δ , мм	5,0
7	Диаметр расточки статора D_S , м (2)	0,312
8	Число витков фазы w_ϕ (4)	2
9	Обмоточный коэффициент $K_{об}$ (предварительно) [4]	0,90
10	МДС фазы F_1 , А (3)	12568
11	Длина ротора l_δ , м (8)	0,43
12	Наружный диаметр статора D_S , м [4] (10)	0,57
13	Толщина скрепляющей оболочки ротора $h_{об}$, мм (17, 18)	21

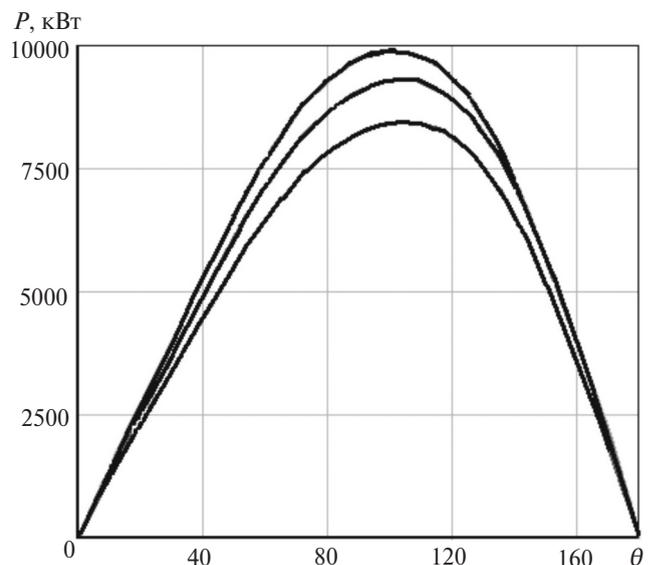


Рис. 3. Угловые характеристики мощного магнитоэлектрического генератора, рассчитанные с применением МКЭ

ны на рис. 3. Вследствие больших немагнитных промежутков между ротором и статором в рассчитанной по статической модели кривой отсутствуют провалы момента и мощности, обусловленные зубчатостью статора. Небольшая магнитная асимметрия ядра ротора по осям d и q из-за сопряжения с силовыми сегментами 3 (рис. 1) является причиной незначительного смещения максимума мощности и момента в область больших значений угла нагрузки, проявляя различимую «явнополюсность».

Для расчёта внешних характеристик потокосцепление фазы, вычисленное по сеточной модели, предварительно рассчитанной относительно векторного магнитного потенциала, подставляется в уравнение, которое следует из векторной диаграммы неявнополюсной машины (рис. 4):

$$U = \frac{1}{\cos \varphi} [E_0 \cos(\theta + \varphi) - R_a I], \quad (19)$$

где R_a – активное сопротивление фазы обмотки якоря; E_0 – амплитуда ЭДС фазы, определённая по амплитуде потокосцепления

$$E_0 = 2\pi f |\Psi_m|, \quad (20)$$

где f – частота сети.

Индуктивное сопротивление обмотки определено по амплитуде потока в спинке статора $\Phi_{сп}$ (рис. 5):

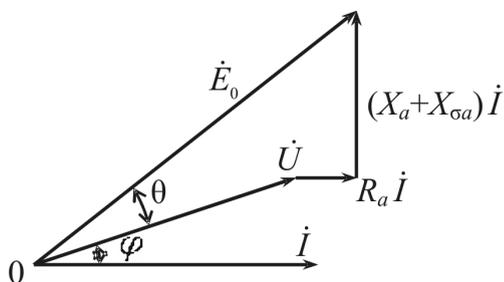


Рис. 4. Векторная диаграмма генератора

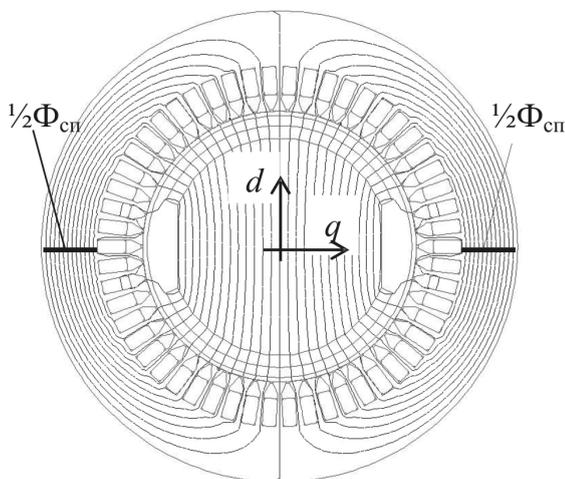


Рис. 5. К определению потока в спинке статора при расчёте индуктивного сопротивления

$$X_a + X_{ca} = 2\pi f w_\Phi \frac{\Phi_{сп}}{I}, \quad (21)$$

где X_a – главный поток; X_{ca} – поток рассеяния («насыщенное» значение).

Рассчитанные по (19) и (20) внешние характеристики не отличаются по форме от аналогичных характеристик других синхронных генераторов [2–4].

Важность проблемы требует также определения температурного состояния магнитов после разработки системы охлаждения с учётом потерь от высших гармоник и передачи тепла на ротор от обмотки статора.

Выводы. 1. При разработке высокооборотных магнитоэлектрических генераторов определение главных размеров необходимо совмещать с оценками механической прочности ротора и устойчивости магнитов к размагничиванию под воздействием токов короткого замыкания.

2. В методику проектирования при этом добавляются следующие расчётные проверки:

на механическую прочность ротора, оцениваемую при определении внешнего диаметра по скорости линейного движения его наружной поверхности;

на устойчивость магнитов к размагничиванию по превышению коэрцитивной силы использованного магнитотвёрдого материала над относительным значением (по отношению к длине магнита в направлении намагничивания) ударного тока короткого замыкания.

3. Переходное индуктивное сопротивление, которое требуется определять при расчёте ударного тока короткого замыкания, предварительно можно определять по индуктивному сопротивлению рассеяния пазовых и лобовых частей обмотки якоря.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнов А.Ю. Индукторные машины. Проектирование и вычислительный анализ (специальный курс): Учебное пос. для вузов. – М.: Форум, 2015, 192 с.
2. Копылов И.П. Электрические машины: Учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 2006, 607 с.
3. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: Учебник для вузов. – М.: Энергия, 1980, 928 с.
4. Копылов И.П., Горяинов Ф.А., Клоков Б.К. и др. Проектирование электрических машин: Учебное пос. для вузов/Под ред. И.П.Копылова. – М.: Энергия, 1980, 496 с.
5. Гольдберг О.Д., Гуринов Я.С., Свириденко И.С. Проектирование электрических машин. – М.: Высшая школа, 1984, 431 с.
6. Балагуров В.А., Галтеев Ф.Ф., Ларионов А.Н. Электрические машины с постоянными магнитами. – М.; Л.: Энергия, 1964, 480 с.
7. Балагуров В.А., Галтеев Ф.Ф. Электрические генераторы с постоянными магнитами. – М.: Энергоатомиздат, 1988, 280 с.

8. **Биргер И., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б.** Расчёт на прочность деталей машин: Справочник. — М.: Машиностроение, 1993, 640 с.

9. **Домбровский В.В.** Справочное пос. по расчёту электромагнитного поля в электрических машинах. — Л.: Энергоатомиздат, 1983, 256 с.

10. **Сильвестер П., Феррари Р.** Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров-электриков.— М.: Мир, 1986, 229 с.

11. **Фисенко В.Г.** Численные расчеты электромагнитных полей в электрических машинах на основе метода конечных элементов. Учебное пос. по курсу «Электромагнитные расчеты»,

по направлению «Электротехника, электромеханика и электро-технологии». — М.: Изд-во МЭИ, 2002, 44 с.

[16.01.2017]

А в т о р: Смирнов Александр Юрьевич окончил Горьковский политехнический институт (ныне Нижегородский государственный технический университет) в 1980 г. В 2007 г. защитил докторскую диссертацию «Силовые электрические машины систем автоматики энергетических установок». Профессор кафедры теоретической и общей электротехники НГТУ им. Р.Е. Алексеева.

Elektrichestvo (Electricity), 2017, No. 11, pp. 40–45

DOI:10.24160/0013-5380-2017-11-40-45

High-Speed Large-Capacity Generators with Permanent Magnets on the Rotor

SMIRNOV Aleksandr Yu. (*The N. Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia*) — *Professor, Dr. Sci. (Eng.)*

To meet the constantly growing level of energy consumption, significant attention is paid to development and construction of generators fitted with high-coercive permanent magnets made using alloys of rare-earth metals. The article describes an approach to designing large-capacity generators with permanent magnets, high unit power capacities of which are achieved owing to a high rotation frequency. The article presents an algorithm and gives a designing examples in which the generator's basic parameters, namely, the bore diameter and the gap length, are determined not only proceeding from the electromagnetic loads (the linear load and induction in the gap), but also taking into account the rotor's mechanical strength, which is estimated from the maximum admissible linear rotor speed at its peripheral surface, and the strength of the clamping sheath made of nonferromagnetic material that embraces the magnets over the external cylindrical surface. The article presents a calculation method for checking the stability of magnets used in the designed generator to demagnetization and points out the specific features pertinent to calculating the angular and external characteristics of a permanent-magnet generator in carrying out check calculations using a mesh model and phasor diagram.

Key words: *high-speed generator, permanent magnets, linear load, clamping sheath, making short-circuit current, angular characteristic, external characteristic*

REFERENCES

1. **Smirnov A.Yu.** *Inductomye mashiny. Proektirovaniye i vychislitel'nyi analiz (spets. kurs)* (Inductor machines. Design and computational analysis (special rate). Moscow, Publ. «Forum», 2015, 192 p.

2. **Kopylov I.P.** *Elektricheskiye mashiny* (Electrical machines). Moscow, Energoatomizdat, 1986, 360 p.

3. **Ivanov-Smolenskii A.V.** *Elektricheskiye mashiny* (Electrical machines). Moscow, Publ. «Energiya», 1980, 928 p.

4. **Kopylov I.P., Goryainov F.A., Klokov B.K.** *Proektirovaniye elektricheskikh mashin* (Design of electric machines)/Edit. by I.P. Kopylov. Moscow, Publ. «Energiya», 1980, 496 p.

5. **Goldberg O.A., Gurin Ya.S., Sviridenko I.S.** *Proektirovaniye elektricheskikh mashin* (Design of electric machines). Moscow, Publ. «Vysshaya shkola», 1984, 431 p.

6. **Balagurov V.A., Galteyev F.F., Larionov A.N.** *Elektricheskiye mashiny s postoyannymi magnitami* (Electrical Machines with Permanent Magnets). Moscow; Leningrad, Publ. «Energiya», 1964, 480 p.

7. **Balagurov V.A., Galteyev F.F.** *Elektricheskiye generatory s postoyannymi magnitami* (Electrical Generators with Permanent Magnets). Moscow, Energoatomizdat, 1988, 280 p.

8. **Birger I., Shorr B.F., Iosilevich G.B.** *Raschet na prochnost' detalei mashin: Spravochnik* (Strength calculator of machine components. Handbook). Moscow, Publ. «Mashinostroyeniye», 1993, 640 p.

9. **Dombrovskii V.V.** *Spravochnoye pos. po raschetu elektromagnitnogo polya v elektricheskikh mashinakh* (Handbook on electromagnetic field calculation in electric machines). Leningrad, Energoatomizdat, 1983, 256 p.

10. **Silvester P., Ferrari P.** *Metod konechnikh elementov dlya radioinzhenerov i inzhenerov-elektrikov* (Finite element method for radio and electrical engineers). Moscow, Publ. «Mir», 1986, 229 p.

11. **Fisenko V.G.** *Chislenniye rascheti elektricheskikh mashin na osnove metoda konechnykh elementov* (Numerical calculations of electric machines by finite element method). Moscow, Publ. of the Moscow Power Engineering Institute, 2002, 44 p.

[16.01.2017]