

## Исследование магнитных систем высокоскоростных мини-турбогенераторов с постоянными магнитами

АНТИПОВ В.Н., ГРОЗОВ А.Д., ИВАНОВА А.В.

*Представлены результаты численного расчета электромагнитного поля трех различных конструктивных исполнений постоянных магнитов высокоскоростных мини-турбогенераторов: с радиально намагниченными кольцевыми секторами, со сплошным и полым цилиндрами, намагниченными по диаметру. Сравнительным исследованием установлено, что конструкция постоянных магнитов в виде сплошного или полого цилиндров, намагниченных по диаметру, может быть реализована при меньших значениях диаметра и активной длины, чем конструкция с радиальным намагничиванием. Дополнительными преимуществами конструкции в виде диаметрально намагниченного сплошного (полого) цилиндра являются практическое отсутствие гармоник высокого порядка в кривой распределения индукции в воздушном зазоре, более высокие значения синхронизирующего момента и близкая к единице вероятность безотказной работы магнитов при рабочих температурах.*

*Ключевые слова: высокоскоростной мини-турбогенератор, постоянные магниты, радиальное намагничивание, диаметрально намагничивание, преимущества конструкции*

Наиболее эффективное развитие децентрализованной энергетики связано с возможно более полным использованием местных ресурсов и применением когенерационных технологий для совместной выработки электричества и теплоты.

Разработанное для этих технологий новое высокоэффективное оборудование – малоразмерные газотурбинные установки мощностью до 200 кВт и частотой вращения до  $100000 \text{ мин}^{-1}$  – отличается не только малыми размерами, но и высокой надежностью, экологичностью и энергоэффективностью. Малоразмерные газотурбинные установки легко объединяются в кластер, что обеспечивает потребителя необходимой установленной мощностью [1]. В малоразмерных газотурбинных установках применена интегральная компоновка мини-турбогенератора с турбиной и компрессором при высоких уровнях тепловых, механических и электромагнитных нагрузок. Перспективным электромеханическим преобразователем энергии для этих установок является синхронная машина с возбуждением от постоянных высококоэрцитивных магнитов нового поколения – высокоскоростной мини-турбогенератор. При его создании необходимо решить несколько задач, обусловленных высокой частотой вращения и увеличением потерь энергии: обеспечить механическую прочность ротора; существенно снизить потери в сердечнике статора, а также на трение ротора о воздух. Требуемые характеристики мини-турбогенератора могут быть обеспечены выбором новых конструкционных, магнитных и ферромагнитных материалов [2–5].

Численный эксперимент на базе современных расчетных методов и пакетов программ позволяет задавать размеры и геометрию машины, учитывать нелинейность характеристик, реальное распределение токов и другие факторы, обеспечивать повышение надежности и точности расчетов, а также оптимизацию конструкции машины на этапе проектирования и изготовления [6–9].

В настоящей работе выполнен анализ влияния на параметры и характеристики мини-турбогенератора способов конструктивного исполнения постоянных магнитов на роторе, применяемых в высокоскоростных синхронных машинах. Рассмотрены три конструкции: радиально намагниченные постоянные магниты на поверхности ротора и магниты в виде сплошного или полого цилиндра, намагниченные по диаметру.

Исследование проведено численными методами на базовой модели трехфазного двухполюсного мини-турбогенератора СГПМ-100-70000 ( $P=100 \text{ кВт}$ ,  $U=500 \text{ В}$ ,  $n=70000 \text{ мин}^{-1}$ ,  $\cos\varphi=0,9$ ) [8-9]. Сердечник статора диаметром 140/65 мм и длиной 200 мм выполнен из холоднокатаной изотропной тонколистовой электротехнической стали 2421 толщиной 0,18 мм, воздушный зазор  $\delta=4 \text{ мм}$ , число витков фазы равно 8, число параллельных ветвей обмотки равно 2. Конструкция ротора турбогенератора выполнена в соответствии с патентом РФ № 2320064 [10]. Магнитная система ротора турбогенератора состоит из набора элементарных неодимовых магнитов высотой 5,5 мм марки N38H (остаточная индукция 1,25 Тл, коэрцитивная сила 900 кА/м), занимающих в окружном направлении две зоны по

130°, между которыми располагаются немагнитные вставки для образования полюсов ротора. Магниты и вставки крепятся на подложке посредством бандажного цилиндра и с торцевых сторон фиксируются запорными кольцами, которые выполнены из меди. В дальнейшем такую конструкцию будем называть конструкцией с радиальным намагничиванием (РНПМ).

Распределение векторного магнитного потенциала плоскопараллельного поля холостого хода и распределение радиальной составляющей магнитной индукции поля по средней линии воздушного зазора для этой конструкции приведено на рис. 1,а. Результат получен численным расчетом двумерного электромагнитного поля методом конечных элементов при использовании программного комплекса ELCUT. Интегральное значение магнитного потока в зазоре, определенное через векторный магнитный потенциал, близко к значению, определенному электромагнитным расчетом (см. табл. 1).

Конструкция с цилиндрическим магнитом представляет собой набранный по оси машины пакет отдельных дисков или колец, намагниченных по диаметру, и охваченный немагнитным бандажным цилиндром ротора. В дальнейшем такие исполнения будем называть конструкциями с диаметрально намагниченным сплошным (полым) цилиндром: ДНСЦ и ДНПЦ.

Для конструкций ДНСЦ и ДНПЦ при выполнении электромагнитного расчета необходимо знать значения высоты и ширины магнита. Для диаметрально намагниченного цилиндра (рис. 1,б) линии векторного магнитного потенциала в зазоре имеют радиальное направление, поэтому высота элементарного выделенного магнита равна  $h_{mv} = 0,5d \cos \beta$ , где  $d$  – диаметр цилиндра;  $\beta$  – угол, отсчитываемый от оси намагничивания. Средняя высота магнита  $h_{mcp} = \frac{2}{\pi} 0,5d = d/\pi$ . Ширина элементарного магнита через ширину полюсной поверхности определяется выражением  $b_{mv} = b_{sv} \cos \beta$ , тогда средняя ширина магнита

$$b_{cpl} = \frac{2}{0,5\pi} \int_0^{0,5\pi} \frac{\pi d}{4} \cos \beta d\beta = d.$$

В случае диаметрально намагниченного кольца для нахождения средних значений  $h_{cp}$  и  $b_{cp}$  проведем хорду большого круга (диаметром  $d$ ) так, чтобы она касалась окружности меньшего круга (диаметром  $d_1$ ) в одной точке. Стрелка этой хорды равна  $h = 0,5(d - d_1) = 0,5d(1 - \cos 0,5\varphi)$ , длина  $s = d \sin 0,5\varphi$ , а соотношение между углами  $\varphi = \pi - 2\beta$ .

Угол  $\beta_1 = \arcsin(d_1/d)$  разделяет кольцо на две части, для которых могут быть найдены средние значения высоты магнита:

$$h_{mcp} = \frac{1}{0,5\pi(h_{mcp1}(0,5\pi - \beta_1) + h_{mcp2}\beta_1)}.$$

Первая составляющая определяется как средняя высота цилиндра диаметром  $d$  на интервале от  $\beta_1$  до  $\pi/2$ :

$$h_{mcp1} = \frac{1}{0,5\pi - \beta_1} \int_{\beta_1}^{0,5\pi} 0,5d \cos \beta d\beta = \frac{0,5(d - d_1)}{0,5\pi - \beta_1}.$$

Вторая составляющая определяется как разность средних значений высоты диска диаметром  $d$  на интервале от 0 до  $\beta_1$  и диска диаметром  $d_1$  на интервале от 0 до  $0,5\pi$ :

$$h_{mcp2} = \frac{1}{\beta_1} \int_0^{\beta_1} 0,5d \cos \beta d\beta - \frac{2}{\pi} \int_0^{0,5\pi} 0,5d_1 \cos \beta d\beta = \frac{0,5d_1}{\beta_1} - \frac{d_1}{\pi}.$$

Средняя высота магнита конструкции ДНПЦ

$$h_{mcp} = \frac{2}{\pi} \left( \frac{0,5(d - d_1)}{0,5\pi - \beta_1} (0,5\pi - \beta_1) + \left( \frac{0,5d_1}{\beta_1} - \frac{d_1}{\pi} \right) \beta_1 \right) = \frac{2}{\pi} \left( 0,5d - \frac{d_1 \beta_1}{\pi} \right).$$

Средняя ширина магнита

$$b_{mcp} = \frac{2}{\pi} [b_{mcp1}(0,5\pi - \beta_1) + b_{mcp2}\beta_1].$$

Первая составляющая определяется как средняя ширина диска диаметром  $d$  на интервале от  $\beta_1$  до  $\pi/2$ :

$$b_{mcp1} = \frac{2}{0,5\pi - \beta_1} \int_{\beta_1}^{0,5\pi} \frac{\pi d}{4} \cos \beta d\beta = \frac{d - d_1}{0,5\pi - \beta_1} \frac{\pi}{2}.$$

Вторая составляющая определяется как разность средних значений ширины диска диаметром  $d$  на интервале от 0 до  $\beta_1$  и диска диаметром  $d_1$  на интервале от 0 до  $0,5\pi$ :

$$b_{mcp2} = \frac{2}{\beta_1} \int_0^{\beta_1} \frac{\pi d}{4} \cos \beta d\beta - d_1 = \frac{\pi d_1}{2\beta_1} - \frac{2d_1}{\pi}.$$

Средняя ширина магнита конструкции ДНПЦ

$$b_{mcp} = \frac{2}{\pi} \left( \frac{d - d_1}{0,5\pi - \beta_1} \frac{\pi}{2} (0,5\pi - \beta_1) + \left( \frac{\pi d_1}{2\beta_1} - \frac{2d_1}{\pi} \right) \beta_1 \right) = \left( d - \frac{2d_1 \beta_1}{\pi} \right).$$

В табл. 1 приведены определенные по вышеприведенным формулам значения магнитных пото-

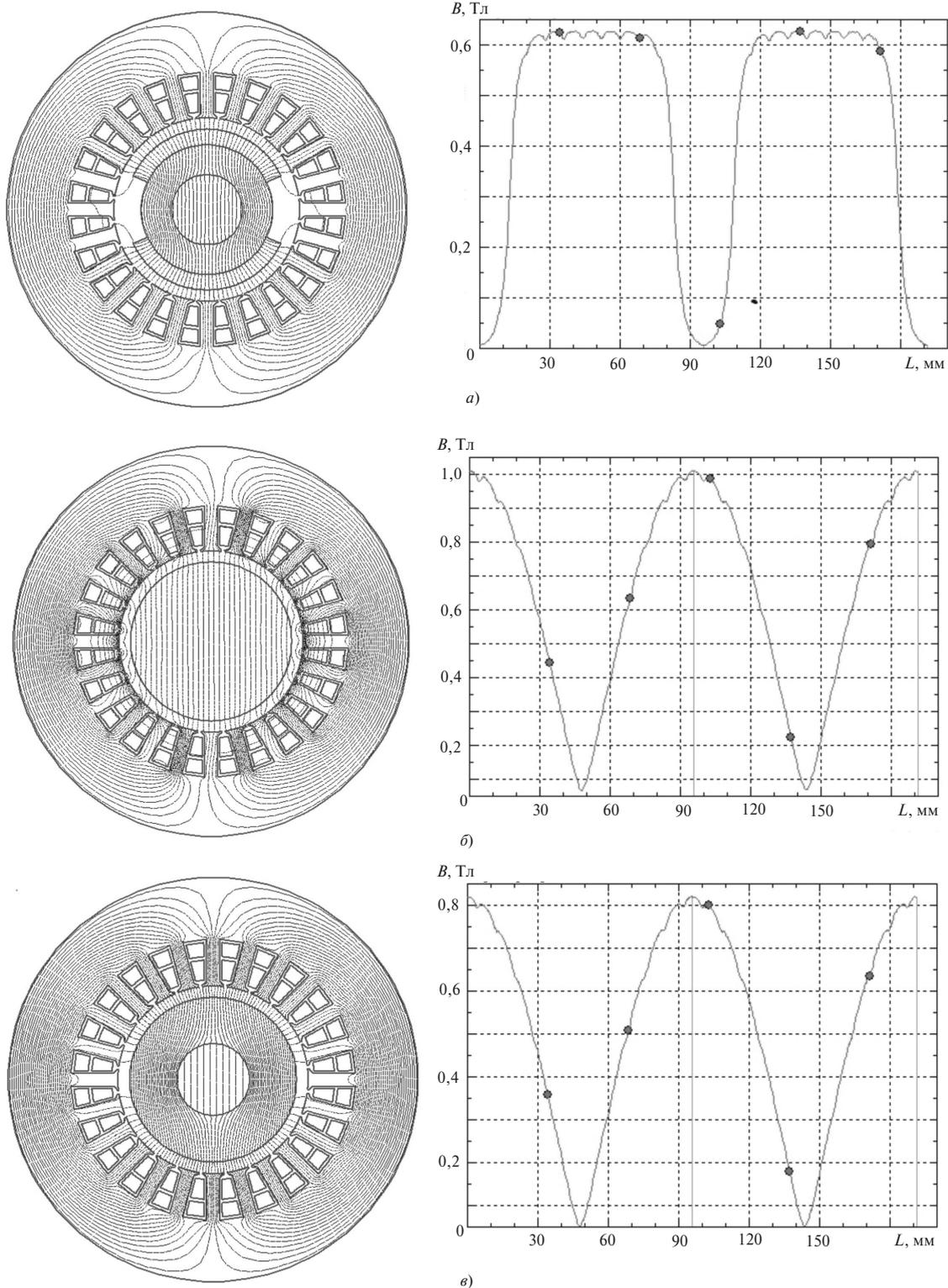


Рис. 1. Распределение векторного магнитного потенциала по поперечному сечению и радиальной составляющей магнитной индукции по средней линии воздушного зазора поля холостого хода генератора: а – РНПМ; б – ДНСЦ; в – ДНПЦ

ков в воздушном зазоре для конструкций постоянных магнитов ДНСЦ и ДНПЦ, которые хорошо совпадают со значениями потоков, определенными расчетом электромагнитного поля (рис. 1, б и в). Распределение поля по поверхности ротора для конструкций ДНСЦ и ДНПЦ синусоидальное, в то время как для радиального намагничивания его

форма близка к трапеции. Магнитные потоки в этих конструкциях больше, чем при радиальном намагничивании, следовательно, генератор может быть спроектирован меньшей активной длины. Если сравнивать рассматриваемые конструкции при одинаковых внешних характеристиках генератора, то конструкция ДНСЦ может быть выполне-

Таблица 1

**Основные результаты исследования постоянных магнитов различной конструкции  
численным расчетом электромагнитного поля**

Параметры	Конструкция						
	РНПМ	ДНСЦ	ДНПЦ	ДНСЦ	ДНПЦ	ДНСЦ	ДНПЦ
Диаметр статора $D_0 / D_i$ , мм	140/65	140/65	140/65	140/65	140/65	135/54	135/54
Активная длина $l_a$ , мм	200	200	200	120	145	120	145
Режим холостого хода							
Магнитный поток $\Phi_{\delta 0}$ , мВб	8,52	12,42	10,84	7,45	7,59	5,62	5,48
Магнитный поток $\Phi_{\delta 0}^*$ , мВб	8,89	12,42	11,12	7,45	7,78	5,86	5,67
Номинальный режим							
Магнитный поток $\Phi_{\delta 0}$ , мВб	7,32	11,36	9,12	6,82	6,38	5,28	5,13
Рассеяние $\sigma$ , отн. ед.	1,13	1,06	1,04	1,06	1,04	1,03	1,03
Режим короткого замыкания ( $I_k=3I_H$ )							
Магнитный поток $\Phi_{mk}$ , мВб	2,04	9,12	6,84	5,47	4,96	3,82	3,25
Магнитный поток $\Phi_{mk}^*$ , мВб	2,35	10,6	8,81	6,36	6,39	3,57	2,67
Продольная ось							
Магнитный поток $\Phi_d$ , мВб	2,52	1,22	1,21	0,73	0,88	0,845	1,00
Потокосцепление $\Psi_d$ , мВб	20,16	9,76	9,70	5,86	7,03	10,14	12,01
Индуктивность $L_d$ , мГн	0,157	0,076	0,076	0,05	0,05	0,08	0,09
$X_d$ , Ом	0,768	0,372	0,369	0,223	0,268	0,386	0,457
$X_d^*$ , Ом	0,847	0,426	0,426	0,271	0,320	0,598	0,704
Поперечная ось							
Поток $\Phi_q$ , мВб	2,500	1,220	1,212	0,732	0,88	0,8448	1,00
Потокосцепление $\Psi_q$ , мВб	20,000	9,760	9,696	5,856	7,03	10,138	12,01
Индуктивность $L_q$ , мГн	0,156	0,076	0,076	0,046	0,05	0,079	0,094
$X_q$ , Ом	0,762	0,372	0,369	0,223	0,268	0,386	0,457
$X_q^*$ , Ом	0,879	0,371	0,377	0,239	0,272	0,527	0,618

Примечание: звездочкой \* отмечены данные электромагнитного расчета.

на на активной длине 120 мм, а конструкция ДНПЦ на длине 145 мм, при этом объем магнитов в этих конструкциях все равно остается выше, чем в конструкции РНПМ (для ДНСЦ — в 2,38, а для ДНПЦ — в 2,24 раза). Тем не менее, сокращение активной длины машины является очень важным показателем при проектировании не только с точки зрения уменьшения габаритов, но и как возможность повышения первой критической частоты вращения и снижения поверхностных потерь трения ротора.

Численные расчеты двумерного электромагнитного поля методом конечных элементов для всех трех исполнений выполнены также для номинального режима и режима короткого замыкания при токе, равном трехкратному номинальному, и

сопоставлены с электромагнитным расчетом в табл. 1.

В номинальном режиме работы для конструкций ДНСЦ и ДНПЦ распределение поля по поверхности ротора практически не искажается, в то время как для РНМ искажение явно присутствует. Соответствующие кривые представлены на рис. 2.

С использованием быстрого преобразования Фурье получены представленные на рис. 3 амплитудные спектры кривых распределения радиальной составляющей магнитной индукции в зазоре. Для конструкции ДНПЦ высшие гармоники в кривой радиальной составляющей магнитной индукции практически отсутствуют, а для конструкции РНМ явно выделяются с заметными амплитудами 3-й

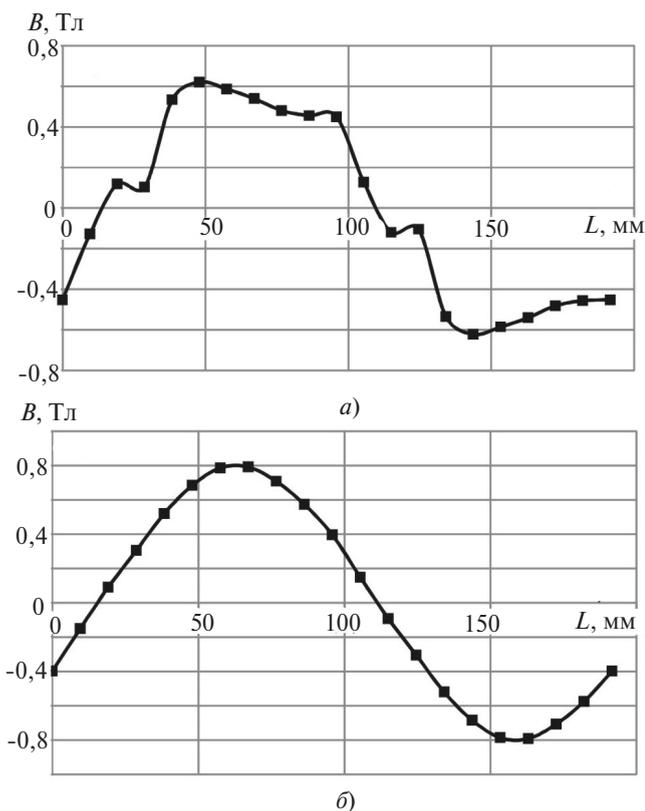


Рис. 2. Распределение радиальной составляющей магнитной индукции по средней линии воздушного зазора в номинальном режиме генератора: а – РНМ; б – ДНПЦ

( $B_{\delta 3 \max} = 0,17B_{\delta 1 \max}$ ), 5-й ( $B_{\delta 5 \max} = 0,143B_{\delta 1 \max}$ ) и 7-й ( $B_{\delta 7 \max} = 0,17B_{\delta 1 \max}$ ) гармоник. Оценка добавочных потерь в роторе от высших гармонических поля статора дает при холостом ходе значение  $(0,5+0,8+1,8)=3,1$  Вт, при коротком замыкании –  $(2,9+5,2+10,3)=18,4$  Вт. Эти добавочные потери, как и основные потери трения ротора об охлаждающую среду, нагревают ротор и, безусловно, должны учитываться при тепловом расчете.

В режиме короткого замыкания магнитные потоки, определенные расчетом электромагнитного поля и электромагнитным расчетом, разнятся в пределах 10%, однако для конструкций ДНСЦ и ДНПЦ токи короткого замыкания, размагничивающие машину, имеют значительно большую кратность по сравнению с радиально намагниченными магнитами:  $I_k / I_n = 7,9$  (7,2) для ДНСЦ (ДНПЦ) по сравнению с  $I_k / I_n = 3,14$  для РНМ.

Расчетом электромагнитного поля определены также значения индуктивности по продольной и поперечной осям машины. При этом расчете в области магнитов сохранена только магнитная проницаемость ( $\mu_{m0} = 1,1$ ), коэрцитивная сила отсутствует, токи в якорной обмотке распределены таким образом, что пиковое значение располагается на оси, противоположной той, для которой определяется индуктивность. По результатам моделирова-

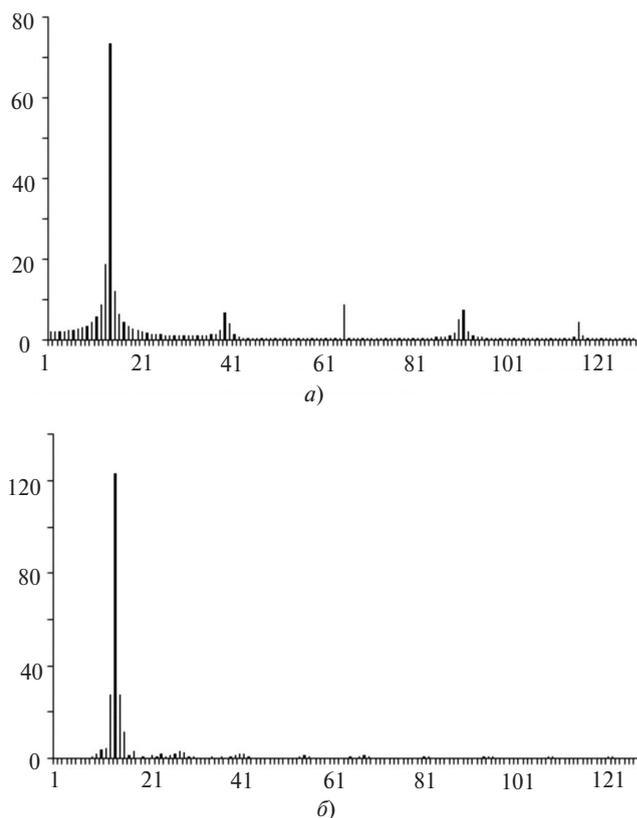


Рис. 3. Спектральная плотность радиальной составляющей магнитной индукции в зазоре: а – РНМ; б – ДНПЦ

ния определены: интегральное потокоцепление, индуктивности, соответствующие распределению векторного магнитного потенциала  $L_n = \psi_n / I$ ,  $L_{d,q} = 2L_n / 3$ , индуктивности и индуктивные сопротивления по продольной и поперечной осям  $X_{d,q} = \omega L_{d,q}$ . Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Полученные результаты позволяют сделать два вывода. Во-первых, электромагнитный расчет дает несколько завышенные (10–13%) по сравнению с расчетом электромагнитного поля результаты, во вторых, конструкции ДНСЦ (ДНПЦ) имеют значительно меньшие значения индуктивных сопротивлений по осям  $d$  и  $q$ , чем конструкция РНМ. Следовательно, генератор будет иметь избыточные значения синхронизирующего момента и отношения короткого замыкания (ОКЗ).

Сравнение показывает, что конструкции ДНСЦ и ДНПЦ должны выполняться на меньшем диаметре ротора, чем конструкция с радиальным намагничиванием. Не имея в виду оптимальное проектирование, для корректного сопоставления вариантов рассмотрим генератор с теми же выбранными номинальными данными, с постоянными магнитами конструкции ДНСЦ и ДНПЦ при сердечнике статора с диаметром 135/54 мм и длиной 120 (145) мм, воздушным зазором  $\delta = 3$  мм и увеличенным числом витков фазы, равным 12. Повышение

Таблица 2

## Сравнение основных данных мини-турбогенератора СГПМ-100-70000 с различной конструкцией постоянных магнитов

Конструкция	Параметры										
	$D_0 / D_i$ , мм	$l_a$ , мм	$\delta$ , мм	$w$	$j$ , А/мм <sup>2</sup>	$A$ , А/см	$B_\delta$ , Тл	$X_d^*$	$X_q^*$	$I_k / I_n$	$K_{зап}$
РНПМ	140/65	200	3	8	5,9	302	0,539	0,376	0,391	3,14	1,30
ДНСЦ	135/54	120	3	12	9,45	544	0,607	0,266	0,234	4,39	1,47
ДНПЦ	135/54	145	3	12	9,45	544	0,486	0,313	0,275	3,61	1,44

числа витков фазы требует некоторого увеличения площади паза и повышения плотности тока.

Характеристики, полученные в результате расчета электромагнитного поля, представлены в табл. 1 и сопоставлены с электромагнитным расчетом. На рис. 4 показано распределение векторного магнитного потенциала и радиальной составляющей магнитной индукции по средней линии воздушного зазора в номинальном режиме для конструкции постоянных магнитов с диском и кольцом.

Несмотря на уменьшение основных размеров генератора для конструкций ДНСЦ и ДНПЦ значения коэффициентов запаса по магнитам остаются высокими –  $K_{зап} = 1,47$  (1,44), что повышает показатели надежности постоянных магнитов.

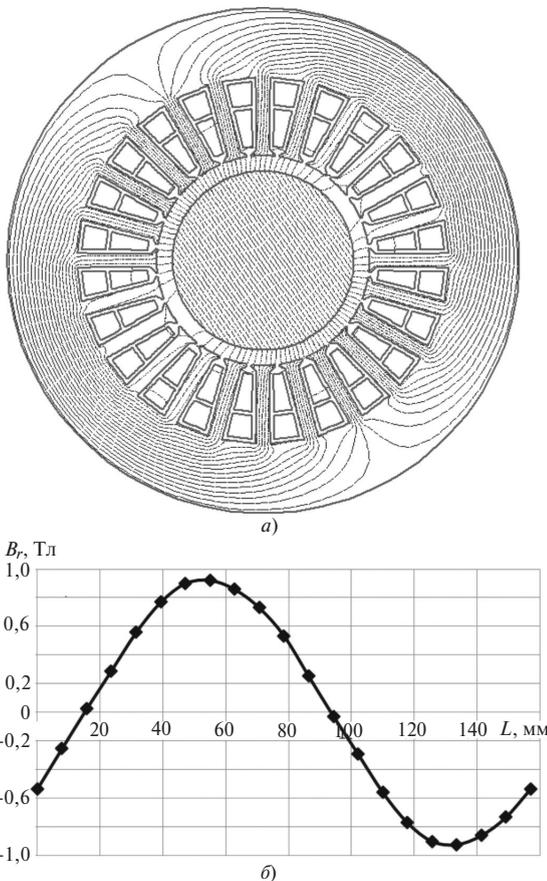


Рис. 4. Распределение векторного магнитного потенциала по поперечному сечению и радиальной составляющей магнитной индукции по средней линии воздушного зазора поля номинальной нагрузки генератора для конструкции ДНСЦ

Известно, что для магнитотвердых спеченных материалов на основе сплавов NdFeB и SmCo характерны большие сроки старения (50–100 лет), причем параметры размагничивания сильно зависят от рабочей температуры магнита. Допустимое время эксплуатации магнита характеризуется выражением  $\ln\left(\frac{t_1}{t_0}\right) = \frac{\Delta H}{kT/g}$  [11], где  $t_1$ ,  $t_0$  – текущее и

начальное значения времени;  $\Delta H$  определяется по кривой размагничивания для заданной температуры как разность между напряженностями поля в рабочей точке  $H_n$  и в точке, где начинается резкое изменение намагниченности  $H_M$ . Граничное значение напряженности размагничивания неодимовых магнитов  $H_M$  для различных температур может быть определено из приложения к ГОСТ Р 52956-2008, а рабочее значение коэрцитивной силы – из расчетной диаграммы магнита. Следует заметить, что для радиального намагничивания это значение примерно вдвое больше (322 кА), чем для конструкции ДНСЦ (145 кА) или ДНПЦ (133 кА). Значение  $kT/g$  для оценочных расчетов согласно [10] было принято равным 6,2 ( $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – температура;  $g$  – постоянная, связанная со значением величины активационного объема). Долговечность всех конструкций при температуре 100 °С оказывается очень большой и характеризуется безопасной работой в межремонтный период генератора (30000 ч), практически равной единице. Для температуры 120 °С для конструкций ДНСЦ и ДНПЦ вероятность безотказной работы также равна единице, для конструкции РНПМ долговечность составляет 311210 ч, а вероятность безотказной работы 0,975.

Полученные в результате исследования данные об основных размерах генератора, его электромагнитных нагрузках и характеристиках в зависимости от принятой конструкции постоянных магнитов сведены в табл. 2.

**Выводы.** 1. Сравнительный анализ конструктивных исполнений постоянных магнитов высокоскоростных мини-турбогенераторов в виде радиально намагниченных кольцевых секторов (РНПМ) и в виде сплошных (ДНСЦ) или полых (ДНПЦ) ци-

линдров, намагниченных диаметрально, показал, что конструкция в виде диаметрально намагниченного сплошного и полого цилиндров по сравнению с конструкцией в виде радиально намагниченных кольцевых секторов РНПМ позволяет снизить диаметр ротора на 17% и активную длину на 40 и 27,5% соответственно.

2. Дополнительными преимуществами конструкции в виде диаметрально намагниченного сплошного (полого) цилиндра являются практически полное отсутствие гармонических высокого порядка в кривой распределения индукции в воздушном зазоре, более высокие значения синхронизирующего момента и близкая к единице вероятность безотказной работы при рабочих температурах.

3. Преимущества конструкции, выполненной в виде диаметрально намагниченного сплошного (полого) цилиндра, достигаются при увеличении объема магнитов в 1,5 (1,3) раза.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Рассохин В.А., Забелин Н.А., Матвеев Ю.В.** Основные направления развития микротурбинных технологий в России и за рубежом. — Научно-технические ведомости СПбГПУ, 2011, No. 4, с. 41–51.
2. **Данилевич Я.Б., Антипов В.Н., Кручинина И.Ю., Хозиков Ю.Ф.** Турбогенераторы малой мощности для децентрализованных систем энергообеспечения. С.-Петербург: Наука, 2009, 102 с.
3. **Антипов В.Н., Кручинина И.Ю.** Проблемные вопросы создания высокоскоростных микротурбогенераторов и пути их решения. — Информационно-управляющие системы, 2012, No. 4, с. 25–34.
4. **Геча В.Я., Захаренко А.Б.** Новые технические решения для создания высокооборотного энергоэффективного электроагрегата. — Вопросы электромеханики, 2012, т. 130, с. 3–6.
5. **Данилевич Я.Б., Антипов В.Н., Кручинина И.Ю.** Перспективные электромеханические преобразователи энергии на основе новых материалов и покрытий. — Электротехника, 2010, No. 9, с. 2–9.
6. **Gieras J.F., Jonsson U.** Design of a High-Speed Magnet Brushless Generator for Microturbines. — Electromotion, 2005, vol. 12, No. 2–3, pp. 86–91.

7. **Danilevich J.B., Antipov V.N., Kruchinina I.Yu., Khozikov Yu.Ph., Ivanova A.V.** Prospective Permanent Magnet Turbogenerator Design for Local Power Engineering. — Proc. of XIX Intern. Conf. on Electrical Machines (ICEM-2010), paper No. 003603, Sept. 2010.

8. **Иванова А.В., Антипов В.Н.** Влияние характеристик перспективных высококоэрцитивных магнитов на параметры синхронных машин нетрадиционной энергетики. — Материалы научной конференции «Неорганическая химия — фундаментальная основа в материаловедении керамических, стеклообразных и композиционных материалов», 2016, с. 74–77.

9. **Антипов В.Н., Грозов А.Д., Иванова А.В.** Выбор магнитных и ферромагнитных материалов для высокоскоростных мини-турбогенераторов. — Электричество, 2017, №7, с. 38–46.

10. **Патент на изобретение RUS 2320064.** Ротор синхронной электрической машины / Я.Б. Данилевич, В.Н. Антипов, А.Д. Грозов, 2008, No. 8.

11. **Каневский Е.И., Казина Г.А., Орлова Т.С., Колпакова Н.Ф., Нечупуренко И.С.** Долговечность постоянных магнитов. — Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника, 2008, вып. 1 (494), с. 14–24.

[09.04.2018]

*А в т о р ы: Антипов Виктор Николаевич окончил Ленинградский политехнический институт (ныне Санкт-Петербургский государственный политехнический университет) в 1963 г. Защитил докторскую диссертацию «Обеспечение заданных коммутационных качеств при проектировании машин постоянного тока промышленного назначения» в 1989 г. Ведущий научный сотрудник Института химии силикатов имени И.В. Гребенщикова РАН (ИХС РАН).*

*Грозов Андрей Дмитриевич окончил Ленинградский политехнический институт в 1979 г. Научный сотрудник ИХС РАН.*

*Иванова Анна Владимировна окончила Ленинградский государственный университет в 1979 г. Защитила кандидатскую диссертацию «Колебания модели упругого летательного аппарата в виде системы тонкостенных стержней в турбулентной атмосфере» в 1989 г. Старший научный сотрудник ИХС РАН.*

## Studying the Magnetic Systems of High-Speed Mini Turbine Generators with Permanent Magnets

**ANTIPOV Viktor N.** (Russian Academy of Sciences (RAS), Institute of Silicate Chemistry (ISCh), St. Petersburg, Russia) — Leading scientist, Dr. Sci. (Eng.)

**GROZOV Andrey D.** (RAS ISCh, St. Petersburg, Russia) — Scientist

**IVANOVA Anna V.** (RAS ISCh, St. Petersburg, Russia) — Senior Scientist, Cand.Sci. (Eng.)

*The article presents the results from numerical calculation of the electromagnetic field for three different design versions of permanent magnets used in high-speed mini turbine generators: with radially magnetized annular sectors, and with solid and hollow cylinders magnetized over the diameter. It has been found from*

a comparative investigation that permanent magnets in the form of solid and hollow cylinders magnetized over the diameter can be made with smaller diameter and active length as compared with their versions magnetized over the radius. Additional advantages of the design version in the form of a solid (hollow) cylinder magnetized over the diameter are that the induction distribution curve in the air gap contains almost no higher-order harmonic components, that the machine has higher synchronizing torque values, and that the probability of magnet failure-free operation at the working temperatures is close to unity.

**Key words:** high-speed mini turbine generator, permanent magnet, radial magnetization, diametral magnetization, design advantages

## REFERENCES

1. **Rassokhin V.A., Zabelin N.A., Matveyev Yu.V.** *Nauchno-tehnicheskiye vedomosti SPbGPU – in Russ. (Scientific and technical gazette of the St. Petersburg State Polytechnical University)*, 2011, No. 4, pp. 41–51.
2. **Danilevich Ya.B., Antipov V.N., Kruchinina I.Yu., Khozikov Yu.Ph.** *Turbogeneratory maloi moshchnosti dlya detsentralizovannykh system energoobespecheniya* (Small-capacity turbine generators for decentralized power supply systems). St. Petersburg: Institute of Silicate Chemistry of the Russian Academy of Sciences, 2009, 102 p.
3. **Antipov V.N., Kruchinina I.Yu.** *Informatsionno-upravlyayushchiye sistemy – in Russ. (Information Management Systems)*, No. 4, pp. 25–34.
4. **Gecha V.Ya., Zakharenko A.B.** *Voprosy elektromekhaniki – in Russ. (Electromechanic questions)*, 2012, vol. 130, pp. 3–6.
5. **Danilevich Ya.B., Antipov V.N., Kruchinina I.Yu.** *Elektrotehnika – in Russ. (Power Engineering)*, 2010, No. 9, pp. 2–9.
6. **Gieras J.F., Jonsson U.** Design of a High-Speed Magnet Brushless Generator for Microturbines. – *Electromotion*, 2005, vol. 12, No. 2–3, pp. 86–91.
7. **Danilevich J.B., Antipov V.N., Kruchinina I.Yu., Khozikov Yu.Ph., Ivanova A.V.** Prospective Permanent Magnet Turbogenerator Design for Local Power Engineering. – Proc. of XIX Intern. Conf. on Electrical Machines (ICEM-2010), paper No. 003603, Sept. 2010.
8. **Ivanova A.V., Antipov V.N.** *Materialy nauchnoi conf. «Neorganicheskaya khimiya – fundamental'naya osnova v materialovedenii keramicheskikh, stekloobraznykh i kompozitsionnykh materialov» – in Russ. (Inorganic Chemistry – a Fundamental Basis of the Science of Ceramic, Glass-like and Composite Materials)*, 2016, pp. 74–77.
9. **Antipov V.N., Grozov A.D., Ivanov A.V.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2017, No. 7, pp. 38–46.
10. **Pat. na izobreteniyе RUS 2320064.** Rotor sinkhronnoi elektricheskoi mashiny (Pat. for invention RUS 2320064. Rotor synchronous electric machine)/Ya.B. Danilevich, V.N. Antipov, A.D. Grozov. *Bulletin of inventions*, 2008, No. 8.
11. **Kanevskiy Ye.I., Kazina G.A., Orlova T.S., Kolpakova N.F., Nechupurenko I.S.** *Elektronnaya tekhnika. Ser. 1. SVCh-tekhnika* (Electronic equipment. Ser. 1. SHV-technics), 2008, iss. 1 (494), pp. 14–24.

[09.04.2018]