

16. **Grop D.** *Metody identifikatsii sistem* (Methods of systems identification). Moscow, Publ. «Mir», 1979, 302 p.
17. **L'jung L.** *Identifikatsiya sistem. Teoriya dlya pol'zovatelya* (Identification of the systems. Theory for the user). Moscow, Central editorial office of the physical and mathematical literature, 1991, 432 p.
18. **Tsyppin Ya.Z.** *Osnovy informatsionnoi identifikatsii* (Foundations of information identification). Moscow, Publ. «Nauka», 1984, 248 p.
19. **Pintelon R., Schoukens J.** *System Identification: A Frequency Domain Approach*, Wiley, 2012, 788 p.
20. **Dorf R., Bishop R.** *Sovremennye sistemy upravleniya* (Modern management systems). Moscow, Laboratory of Basic Knowledge, 2002, 832 p.
21. **Kailath T.** *Linear Systems*. Prentice Hall. Englewood Cliffs. NJ, 1980, 682 p.
22. **Pintelon R., Schoukens J.** Box-Jenkins identification revisited. Part I: Theory. — *Automatica*, 2005, vol. 42, No. 1, pp. 63–75.
23. **Pintelon R., Schoukens J.** Box-Jenkins identification revisited. Part II: Applications. — *Automatica*, 2005, vol. 42, No. 1, pp. 77–84.
24. **Sovremennye metody identifikatsii/Pod redaktsiyey P. Eikhoffa** (Modern methods of identification/Edit. by Eykhoff). Moscow, «Mir», 1983, 402 p.
25. **Golub J., Van Laun Ch.** *Matrichnye vychisleniya* (Matrix Computing). Moscow, Publ. «Mir», 1999, 548 p.
26. **Tuzlukova Ye.V.** *Razvitiye metodov analiza dinamicheskikh svoystv energosistem na osnove...* (Development of the dynamic properties of power systems analysis methods...). Diss. for the Degree of Cand. Sci. (Eng.). Moscow, Moscow Power Engineering Institute, 2004, 195p.
27. **Zybin Ye.Yu., Misrikhanov M.Sh., Ryabchenko V.N.** *Automatika i Telemekhanika — in Russ. (Automation and Telemechanics)*, 2006, No. 5, c. 119–132.

[05.04.2017]

\* \* \*

Электричество, 2017, № 7, с. 38–46

DOI:10.24160/0013-5380-2017-7-38-46

## Выбор магнитных и ферромагнитных материалов для высокоскоростных мини-турбогенераторов

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

*Представлены результаты исследования параметров высокоскоростных мини-турбогенераторов в зависимости от характеристик применяемых материалов — высококоэрцитивных магнитов и ферромагнитных материалов сердечника статора. Численным экспериментом установлено, что объем магнитов вызывает заметное изменение потерь в меди и стали, КПД и общей массы генератора; за счет выбора характеристик электротехнической стали достигается снижение потерь на 50%. Преимущества 4-полюсной конструкции мини-турбогенератора реализуются только при применении аморфного или нанокристаллического сплава, что позволяет вдвое снизить массу машины и увеличить КПД на 2%. Предложена методика оценки параметров мини-турбогенераторов по характеристикам выбранных материалов, основанная на поиске оптимального решения задачи линейного программирования. Коэффициенты при переменных целевых функций установлены численным экспериментом. Погрешность оценки по предложенной методике не превышает 2%. Методика применима к размерному ряду мини-турбогенераторов.*

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** высокоскоростной мини-турбогенератор, выбор магнитных материалов, линейное программирование, постоянный магнит, электротехническая сталь

Преимущества синхронной машины с возбуждением от постоянных высококоэрцитивных магнитов нового поколения в полной мере реализованы в высокоскоростных мини-турбогенераторах для малоразмерных газотурбинных установок [1–9].

При проектировании и изготовлении мини-турбогенератора необходимо решить несколько задач, связанных с большой частотой вращения и повышенными значениями потерь энергии: обеспечить механическую прочность ротора; существенно снизить потери в сердечнике статора, а также на трение ротора о воздух. Цель может быть достигнута

как выбором новых конструктивных решений, так и применением новых материалов постоянных магнитов, аморфных и наноструктурированных сплавов, антифрикционных покрытий ротора.

Повышение точности расчетов и оптимизация конструкции машины на этапе проектирования достигаются численным экспериментом на базе современных расчетных методов и пакетов программ, что позволяет учитывать нелинейность характеристик, реальное распределение токов и другие факторы.

В статье предложено оценивать выбор материалов при проектировании высокоскоростных ми-

ни-турбогенераторов путем решения задачи линейного программирования, в которой коэффициенты при переменных целевой функции получены в результате численного эксперимента. В качестве базовой модели мини-турбогенератора для выполнения численного эксперимента выбран проект ранее разработанного генератора СГПМ-100-70000 ( $P=100$  кВт,  $U=500$  В,  $I=128,3$  А,  $n=70000$  мин<sup>-1</sup>,  $m=3$ ,  $\cos\varphi=0,9$ ), в котором сердечник статора выполнен из электротехнической стали 2411 толщиной 0,18 мм, а поле возбуждения создается высококоэрцитивными постоянными магнитами из сплава неодим-железо-бор марки N38H [10]. Проект выполнен для двухполюсного и четырехполюсного исполнения. Основные размеры и обмоточные данные мини-турбогенератора СГПМ-100-70000:

Число полюсов	2	4
Внешний диаметр, мм	140	116
Внутренний диаметр, мм	65	65
Активная длина, мм	200	197
Зазор, мм	4,0	4,0
Размеры паза, мм	4,5/8,1×16	4,2/7,9×16
Высота спинки, мм	21,5	8,5
Число пазов статора	24	24
Число эффект. проводников в пазу	2	2
Число витков	8	8
Число параллельных ветвей	2	2
Размер проводника, мм	ПЭТ-155 0,93/0,99	ПЭТ-155 0,86/0,89

Для системы возбуждения высокоскоростных мини-турбогенераторов, обладающих высокой плотностью энергии, выбирают высококоэрцитивные магниты из сплавов на основе редкоземельных металлов. Как правило, используют либо Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B (неодим-железо-бор), либо Sm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub> (самарий-кобальт).

Магниты на основе соединения NdFeB обладают наивысшим значением магнитной энергии  $(BH)_{\max} = 440$  кДж/м<sup>3</sup> и дешевле самарий-кобальтовых магнитов [11, 12]. Для этих магнитов характерными являются хорошее соотношение размер/масса/рабочие характеристики; высокие изотропные свойства; устойчивость к размагничиванию; относительно хорошая температурная стабильность магнитных характеристик; способность работать без утраты магнитных свойств в температурном диапазоне при точке Кюри +310 °С и возможность изготовления магнитов практически любых форм и размеров. Недостатком магнитов из сплава NdFeB является низкая коррозионная стойкость и способность поглощения водорода из окружающей среды, для них разработаны защитные покрытия слоями меди, цинка, никеля, хрома.

Магниты из сплавов SmCo<sub>5</sub> и Sm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub> уступают неодимовым магнитам по коэрцитивной силе и индукции, но, имея точку Кюри более +800 °С, способны работать при более высоких температурах (до +350 °С); являются коррозионностойкими и не нуждаются в защитном покрытии. Недостатками магнитов SmCo являются их высокая стоимость и хрупкость. Высокая цена определяется использованием дорогих редкоземельных металлов самария и кобальта, а также достаточно дорогой технологией очистки этих металлов.

Численный эксперимент проведен для неодим-железо-борных магнитов, поставляемых ЗАО НПП «Редмаг» [11], и для самарий-кобальтовых магнитов марки XGS [12]. Эти магниты по характеристикам соответствуют современному зарубежному уровню и требованиям отечественных стандартов [13, 14].

Влияние характеристик перспективных высококоэрцитивных магнитов на параметры синхронных машин нетрадиционной энергетики исследовано с помощью численных электромагнитных расчетов базовой модели высокоскоростного мини-турбогенератора СГПМ-100-70000 (100 кВт, 70000 мин<sup>-1</sup>) [10]. При вариантных расчетах не менялась конструкция мини-турбогенератора, основные размеры, сохранялись номинальные и обмоточные данные машины. Рассчитано девять вариантов применения различных высококоэрцитивных постоянных магнитов из сплавов неодим-железо-бор и самарий-кобальт. В качестве изменяемых характеристик выбранной марки магнита были приняты остаточная индукция и коэрцитивная сила по индукции. Значения этих величин, выбранные для численного эксперимента, представлены в табл. 1. При расчетах объем радиально намагниченных магнитов мини-турбогенератора изменялся за счет активной длины. Условие завершения вариантного расчета – получение заданной внешней характеристики генератора (отклонение расчетного напряжения при номинальной нагрузке от номинального не более 5%).

Для высокоскоростных мини-турбогенераторов, обладающих высокой плотностью энергии, изменение объема магнитов вызывает изменение и других параметров: потерь в меди и стали, КПД и общей массы генератора. Полученные в результате численного эксперимента данные сведены в табл. 1.

Следует отметить, что полученные данные вариантных расчетов показывают различие, вызванное самим материалом магнита. Для самарий-кобальтовых сплавов характерно не только несколько меньшее по сравнению с неодим-железо-борными сплавами значение коэрцитивной силы по индук-

Таблица 1

Тип магнита	Параметры							
	$B_r$ , Тл	$H_{cb}$ , кА	$l_m$ , мм	$\eta$ , отн. ед.	$p_{Cu}$ , Вт	$p_{Fe}$ , Вт	$M_{pm}$ , кг	$M_{gen}$ , кг
N45H	1,38	955	179	0,9757	233	2014	0,864	52,9
N27H	1,08	836	237	0,9771	274	1769	1,143	65,3
N38H	1,25	899	200	0,9765	248	1899	0,965	57,4
XGS28M	1,1	796	236,5	0,9790	272	1579	1,141	66,3
XGS32	1,15	820	224	0,9801	263	1617	1,081	63,6
XGS30	1,12	820	230	0,9771	269	1776	1,110	63,8
XGSnew	1,1	870	229,5	0,9800	267	1629	1,107	64,8
XGS28M	1,1	796	236,5	0,9790	272	1579	1,141	66,3
XGS28	1,1	820	234	0,9803	270	1595	1,129	65,8

Примечание:  $l_m$  – длина магнита;  $\eta$  – КПД;  $p_{Cu}$  – потери в меди;  $p_{Fe}$  – потери в стали;  $M_{pm}$  – масса магнитов;  $M_{gen}$  – масса генератора.

ции, но и меньшая ее зависимость от остаточной индукции.

За счет выбора характеристик магнитов их объем и активная длина машины могут быть изменены на 30% (рис. 1,а), КПД машины может отличаться на 0,5% (рис. 1,б), масса генератора может быть изменена на 25% (рис. 1,в).

В результате применения самарий-кобальтовых сплавов получаем более высокие значения КПД, но и большую массу генератора.

Полученная в результате численного эксперимента база данных о влиянии характеристик магнитов на параметры высокоскоростных мини-турбогенераторов позволяет предложить методику оценки такого влияния путем решения задачи линейного программирования [15, 16]. Вариация применяемой марки магнита обеспечивает выполнение требований, предъявляемых к мини-турбогенератору (заданные номинальные параметры, поперечная геометрия, внешняя характеристика генератора), в то же время меняет такие его параметры, как активная длина, объем магнитов, потери в меди и стали, КПД и масса генератора.

Таким образом, решая задачи линейного программирования для магнитов обоих типов в качестве целевой функции

$$z = \min(C_1 x_1 + C_2 x_2), \quad (1)$$

может быть выбрана длина магнита  $l_m$ , масса магнитов  $M_m$ , масса генератора  $M_{gen}$ , потери генератора в меди  $p_{Cu}$ , потери генератора в стали  $p_{Fe}$ , КПД генератора  $\eta$ . Коэффициенты  $C_1$ ,  $C_2$  при переменных целевой функции соответствуют результату электромагнитного расчета для двух магнитов одинакового сплава. Система ограничений записывается для двух характеристик выбранного магнита:

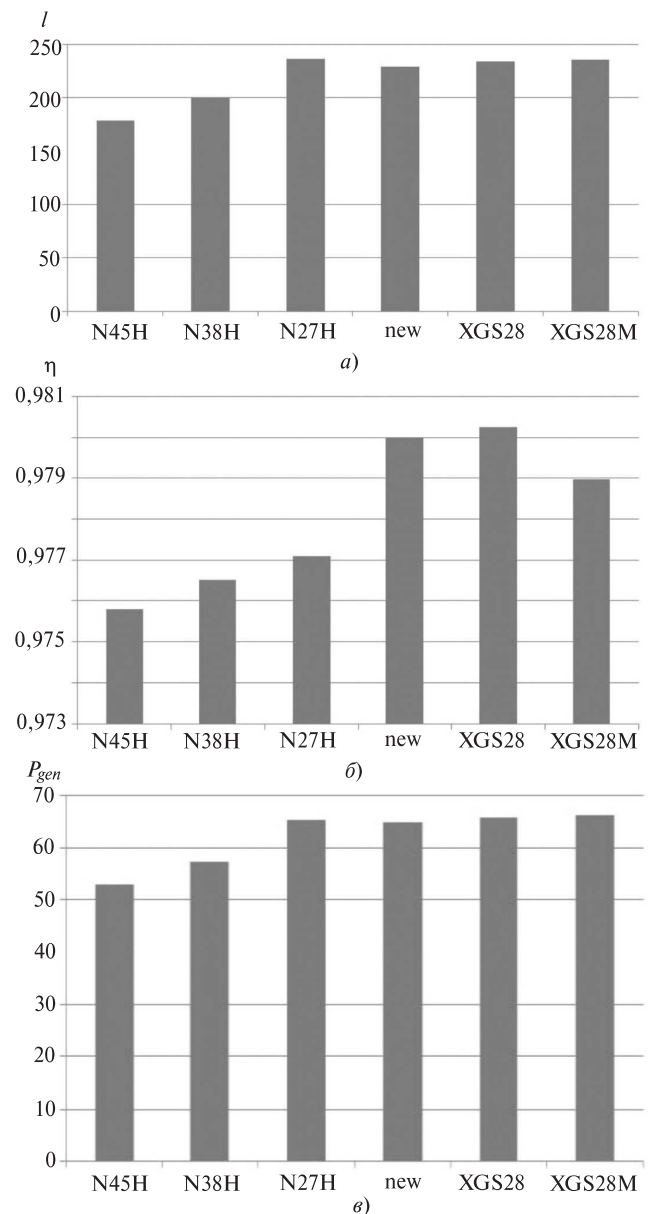


Рис. 1. Зависимость активной длины (а), КПД (б), массы генератора (в) от типа магнита

остаточной индукции и коэрцитивной силе по индукции.

Анализ результатов расчета высокоскоростного мини-турбогенератора для неодим-железо-борных и самарий-кобальтовых сплавов (табл. 1) показывает, что объем магнитов зависит не только от его характеристик, но и от материала выбранного сплава (рис. 1).

Поскольку для неодим-железо-борных магнитов справедливо соотношение

$$\frac{B_{r2}}{B_{r1}} > \frac{H_{cb2}}{H_{cb1}}, \quad (2)$$

ограничения, как правило, можно записать в виде:

$$\begin{aligned} B_{r1}x_1 + B_{r2}x_2 &\leq B_r; \\ H_{cb1}x_1 + H_{cb2}x_2 &\geq H_{cb}; \\ x_1 &\leq 0, \quad x_2 \geq 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Для самарий-кобальтовых сплавов соотношение (2) изменяется:

$$\frac{B_{r2}}{B_{r1}} < \frac{H_{cb2}}{H_{cb1}}, \quad (4)$$

поэтому система ограничений, как правило, имеет вид

$$\begin{aligned} B_{r1}x_1 + B_{r2}x_2 &\geq B_r; \\ H_{cb1}x_1 + H_{cb2}x_2 &\leq H_{cb}; \\ x_1 &\leq 0, \quad x_2 \geq 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Сравнение целевых функций, определенных решением задачи линейного программирования и электромагнитного расчета для редкоземельных магнитов N45H и XGS28M, приведено в табл. 2.

Таким образом, полученные в результате численного эксперимента значения коэффициентов для двух марок магнитов (табл. 1) позволяют определить параметры мини-турбогенератора 100 кВт, 70000 мин<sup>-1</sup> и для других марок магнитов, в том числе и перспективных.

Установленные [17] закономерности изменения геометрических размеров постоянных магнитов для размерного ряда мини-турбогенераторов позволяют оценить влияние выбора характеристик постоянных магнитов на параметры каждой машины размерного ряда. Для размерного ряда высокоскоростных мини-турбогенераторов малоразмерных газотурбинных установок оптимальными закономерностями изменения значений индукции и плотности тока обмотки статора являются зависимости:

$$\frac{B_{\delta jk}}{B_{\delta mn}} = a^{0,5(j-m)}; \quad \frac{B_{zjk}}{B_{zmn}} = a^{0,5(j-m)};$$

$$\frac{j_{ajk}}{j_{amn}} = a^{0,5(j-m)}.$$

Закономерности изменения номинальных данных, основных геометрических размеров и размеров магнитов в зависимости от габарита:

номинальные данные		геометрические размеры			
<i>P, I</i>	<i>n, f</i>	<i>D</i>	<i>L, l<sub>m</sub></i>	<i>b<sub>m</sub>, h<sub>m</sub></i>	
$a^{4(j-m)}b^{k-n}$	$a^{-(j-m)}$	$a^{j-m}$	$a^{j-m} b^{k-n}$	$a^{j-m}$	

Генераторы выполнены на одно и то же напряжение, имеют одну длину статора в габарите ( $a = 1,125, b = 1$ ) и одинаковое число пар полюсов; здесь  $a = \sqrt[4]{c}$ ;  $b = L_{jk} / L_{j(k-1)}$ ;  $P_{jk} / P_{(j-1)k} = c$ .

Размеры постоянного магнита из редкоземельного сплава NdFeB марки N38H для базовой машины, которая в размерном ряду занимает позицию  $j=5$ , равны  $l_m = 200$  мм,  $h_m = 5,5$  мм,  $b_m = 67,4$  мм. Пересчет размеров магнита марки N38H для размерного ряда по выражениям табл. 4 не представляет труда и показан в табл. 3 и на рис. 2.

Решая задачу линейного программирования, можно найти значения длины магнитов для любой другой марки; для марки N45H длина магнита составит 174 мм, а для N27H – 234 мм. Изменение размеров магнитов для размерного ряда мини-турбогенераторов показано в табл. 4.

Таблица 2

Параметр генератора	Целевая функция $z$	Электромагнитный расчет	$\frac{ z_{расч} - z }{z_{расч}}, \%$	Целевая функция $z$	Электромагнитный расчет	$\frac{ z_{расч} - z }{z_{расч}}, \%$
		$z_{расч}$	$z_{расч}$		$z_{расч}$	$z_{расч}$
		N45H		XGS28M		
$l_m$ , мм	180,2	179,0	0,66	236,2	236,5	0,14
$M_{pm}$ , кг	0,869	0,864	0,66	1,139	1,141	0,14
$M_{gen}$ , кг	53,4	52,9	0,97	66,27	66,35	0,11
$\eta$ , отн.ед.	0,9937	0,9758	1,83	0,9804	0,9790	0,14
$P_{Cu}$ , Вт	236	233	1,18	272	272	0,09
$P_{Fe}$ , Вт	2015	2014	0,07	1579	1579	0,00



Таблица 3

$j$	Параметры							
	$a$	$P_j$ , кВт	$n_j$ , мин <sup>-1</sup>	$D_j$ , м	$l_m$ , м	$b_m$ , м	$h_m$ , м	$V_m$ , см <sup>3</sup>
1	1,125	15	112126	0,0406	0,1249	0,0404	0,0034	35
2	1,125	24	99668	0,0457	0,1405	0,0454	0,0039	49
3	1,125	39	88594	0,0514	0,1580	0,0511	0,0043	70
4	1,125	62	78750	0,0578	0,1778	0,0575	0,0049	100
5	1,125	100	70000	0,0650	0,2000	0,0647	0,0055	142
6	1,125	160	62222	0,0731	0,2250	0,0728	0,0062	203
7	1,125	257	55309	0,0823	0,2531	0,0819	0,0070	289
8	1,125	411	49163	0,0925	0,2848	0,0921	0,0078	411

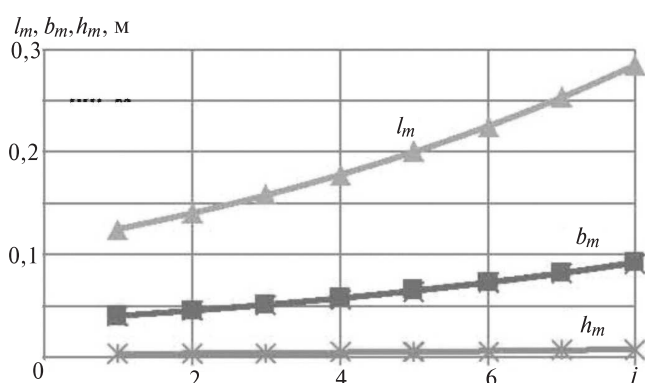


Рис. 2. Изменение размеров магнита N38H для размерного ряда мини-турбогенераторов

На рис. 3, а и б для размерного ряда мини-турбогенераторов показано изменение объема и длины различных марок магнитов из сплава NdFeB. Следует отметить, что требуемый объем магнитов для размерного ряда меняется в меньшей степени, чем номинальная мощность — для увеличения мощности в шесть раз требуется увеличить объем магнитов только в четыре раза.

При проектировании высокоскоростных мини-турбогенераторов одной из важных задач является уменьшение потерь в ферромагнитном материале сердечника статора, которые по сравнению с

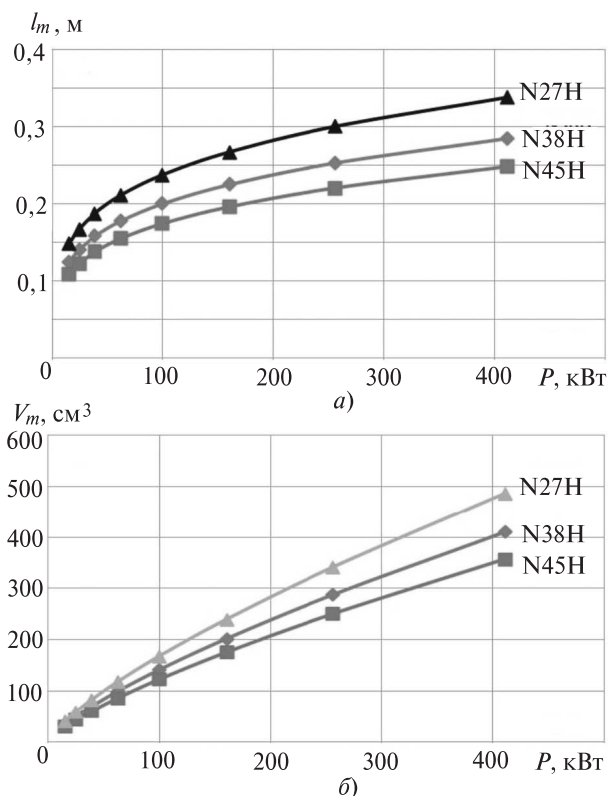


Рис. 3. Изменение длины (а) и объема различных марок магнитов из сплава NdFeB (б) для размерного ряда мини-турбогенераторов

Таблица 4

$P$ , кВт	$V$ , см <sup>3</sup>			$l$ , м		
	N38H	N45H	N27H	N38H	N45H	N27H
15	35	30	41	0,125	0,109	0,148
24	49	43	58	0,140	0,122	0,166
39	70	61	83	0,158	0,137	0,187
62	100	87	118	0,178	0,155	0,211
100	142	124	169	0,200	0,174	0,237
160	203	176	240	0,225	0,196	0,267
257	289	251	342	0,253	0,220	0,300
411	411	357	487	0,285	0,248	0,337

потерями общепромышленных машин имеют повышенное значение из-за высокой частоты перемагничивания электромагнитного поля. Задача решается как ограничением допустимых значений электромагнитных нагрузок, так и выбором ферромагнитного материала. Для изготовления сердечника статора можно применить как электротехническую сталь [18, 19], так и аморфные и наноструктурированные сплавы [20, 21].

Численные исследования влияния ферромагнитных материалов на параметры высокоскоростных мини-турбогенераторов выполнены для электротехнической стали 2421 толщиной 0,27 мм [18] и 0,18 мм [19], а также для аморфного сплава ГМ440 [21]; при этом учтена возможность применения как самарий-кобальтовых магнитов, так и магнитов из сплава NdFeB. Поскольку двухполюсная машина с точки зрения массогабаритных показателей не является оптимальной [2], выполнен электромагнитный расчет базовой модели четырехполюсной машины, что привело к изменению всех параметров генератора. План численного эксперимента включает 30 электромагнитных расчетов. Выходными параметрами численного эксперимента являются потери в стали, КПД машины, масса генератора, активная длина.

Таблица 5

Тип магнита	Сталь	$l_m$ , мм	$\eta_z$ , отн.ед.	$P_{Fe}$ , Вт
N45H	2421-0,18	179	97,57	2014
N27H		237	97,71	1769
N38H		200	97,65	1899
N45H	2421-0,27	179	96,52	3142
N27H		237	96,77	2759
N38H		200	96,65	2962
N45H	ГМ-440	179	99,45	84
N27H		237	99,41	82
N38H		200	99,36	80
new	2421-0,18	229,5	98,00	1629
XGS28M		236,5	97,90	1579
XGS28		234	98,03	1595
new	2421-0,27	229,5	97,13	2541
XGS28M		236,5	97,17	2463
XGS28		234	97,06	2488
new	ГМ-440	229,5	99,51	75
XGS28M		236,5	99,51	74
XGS28		234	99,36	74

Результаты численного эксперимента двухполюсной базовой модели, представленные в табл. 5, показывают, что при увеличении толщины листа

стали значительно (на 35–50%) возрастают потери, КПД машины падает примерно на 1%. Остальные параметры генератора зависят от выбора типа магнита.

Применение аморфного сплава ГМ-440 уменьшает потери в 20 раз, КПД увеличивается на 2% (рис. 4).

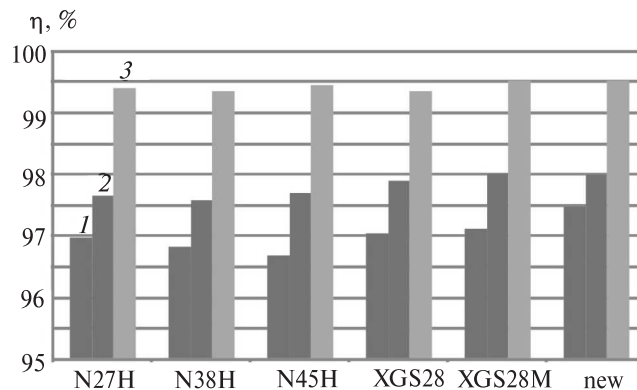


Рис. 4. Сравнение КПД двухполюсного генератора СГПМ-100-70000 при применении стали 2421 толщиной 0,27 мм (1) и 0,18 мм (2) и аморфного сплава ГМ-440 0,025 мм (3)

При решении задачи линейного программирования для выбора ферромагнитных материалов сердечника статора мини-турбогенератора в качестве целевой функции (1) может быть выбран КПД  $\eta$  или потери машины  $(1-\eta)$ . Коэффициенты  $C_1, C_2$  при переменных целевой функции соответствуют решению электромагнитного расчета для двух ферромагнитных материалов. Система ограничений записывается для двух характеристик выбранного материала – толщины листа  $\Delta$  и удельных потерь  $P_{уд}$ :

$$\begin{aligned} \Delta_1 x_1 + \Delta_2 x_2 &\leq \Delta; \\ P_{уд1} x_1 + P_{уд2} x_2 &\geq P_{уд}; \\ x_1 &\leq 0; \quad x_2 &\geq 0. \end{aligned} \tag{6}$$

Эффективность линейного программирования при выборе ферромагнитных материалов сердечника иллюстрируется сравнением результатов линейного программирования и электромагнитного расчета КПД базовой модели (погрешность расчета 0,4%):

ферромагнитный материал	целевая функция $z$	электромагнитный расчет ( $z_{расч}$ )	$\frac{ z_{расч} - z }{z_{расч}}$ , %
2421-0,18	97,70	97,7	—
2421-0,27	96,70	96,7	—
2412-0,35	95,72	95,73	-0,1
2412-0,5	95,03	95,26	-0,24
ГМ-440	99,85	99,45	0,40

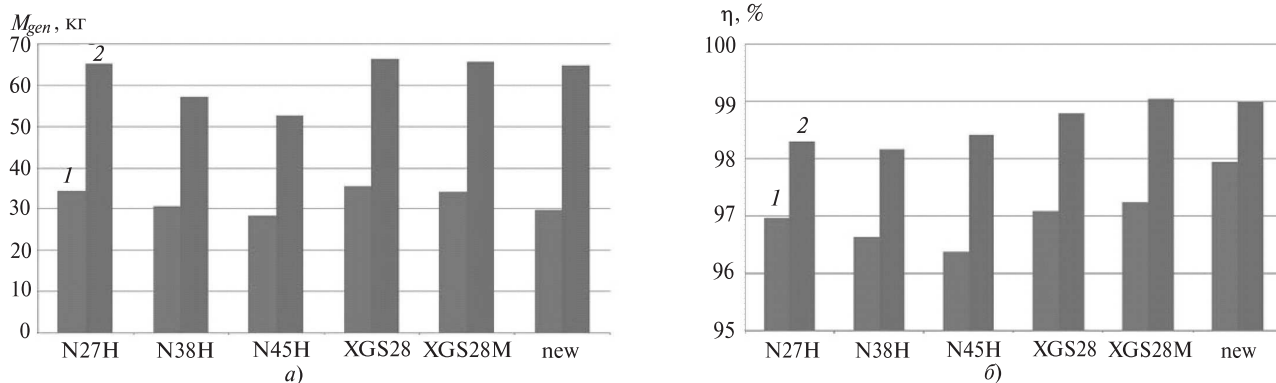


Рис. 5. Сравнение массы (а) и КПД (б) генераторов для стали 2411-0,18 при различном числе пар полюсов: 1 –  $2p = 4$ ; 2 –  $2p = 2$

По результатам численных расчетов четырехполюсной базовой модели мини-турбогенератора составлена табл. 6, отражающая зависимость КПД и потерь в стали мини-турбогенератора от числа полюсов. Переход к четырехполюсному генератору приводит к снижению массы машины примерно вдвое (рис. 5), одновременно увеличиваются потери в электротехнической стали на 35–50% и снижается КПД примерно на 1%.

Таблица 6

Тип магнита	Сталь	$l_m$ , мм	$\eta_z$ , отн.ед.	$p_{Fe}$ , Вт
N45H	ГМ-440	178	99,32	90
N27H		228,3	99,21	83
N38H		197	99,28	87
N45H	2421-0,18	178	96,69	2838
N27H		228,3	96,98	2398
N38H		197	96,82	2644
new	ГМ-440	190	99,44	72
XGS28M		226	99,36	83
XGS28		236,5	99,34	86
new	2421-0,18	190	97,47	2096
XGS28M		226	97,12	2405
XGS28		236,5	97,04	2470

В большинстве случаев переход на четырехполюсное исполнение при сохранении сердечника статора и электротехнической стали затруднителен из-за увеличенных потерь и проблем с охлаждением машины. Уменьшить потери в стали четырехполюсного генератора возможно при применении для сердечника статора аморфного сплава ГМ-440 (рис. 6), что, однако, требует изменения конструкции сердечника статора [5].

Разница между параметрами при различной полюсности столь очевидна, что задачу линейного программирования следует ставить и решать отдельно для двухполюсного и четырехполюсного генераторов.

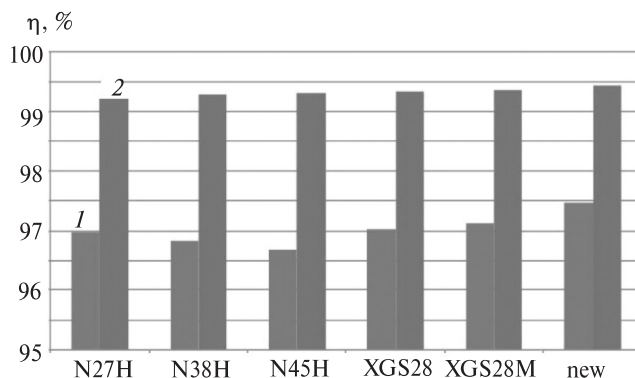


Рис. 6. Сравнение КПД четырехполюсного генератора СГПМ-100-70000 при применении стали 2421 толщиной 0,18 мм (1) и аморфного сплава ГМ-440 (2)

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данилевич Я.Б., Антипов В.Н., Кручинина И.Ю., Хозиков Ю.Ф. Турбогенераторы малой мощности для децентрализованных систем энергообеспечения. – Санкт-Петербург: Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН, 2009, 102 с.
2. Ледовский А.Н. Электрические машины с высокоэффективными постоянными магнитами. – М.: Энергоатомиздат, 1985, 168 с.
3. Danilevich J.B., Kruchinina I.Yu., Antipov V.N., Khozikov Yu.Ph., Ivanova A.V. Some Problems of the High-Speed Permanent Magnet Minuturbogenerators Development. – Proc. of the XVIII Intern. Conf. on Electrical Machines. Paper ID 942. IEEE Catalog Number: CFP0890B-CDR. ISBN: 978-1-4244-1736-0. Vilamoura (Portugal), 2008.
4. Антипов В.Н., Кручинина И.Ю. Проблемные вопросы создания высокоскоростных микротурбогенераторов и пути их решения. – Информационно-управляющие системы, 2012, № 4, с. 25–34.
5. Геча В.Я., Захаренко А.Б. Новые технические решения для создания высокооборотного энергоэффективного электроагрегата. – Вопросы электромеханики, 2012, т. 130, с. 3–6.
6. Данилевич Я.Б., Антипов В.Н., Кручинина И.Ю. Перспективные электромеханические преобразователи энергии на основе новых материалов и покрытий. – Электротехника, 2010, № 9, с. 2–9.
7. Рассохин В.А., Забелин Н.А., Матвеев Ю.В. Основные направления развития микротурбинных технологий в России и за рубежом. – Научно-технические ведомости СПбГПУ, 2011, № 4. с. 41–51.
8. 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.
9. 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 the XIX Intern. Conf. on Electrical Machines (ICEM-2010), Paper No. 003603. Rome (Italy), Sept. 2010.

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

11. <http://redmagnit.com/61.html>

12. <http://china-magnets.ru.bossgoo.com/>

13. **ГОСТ Р 52956-2008.** Материалы магнитотвердые спеченные на основе сплава неодим-железо-бор. Классификация. Основные параметры. – М.: Стандартинформ, 2008, 12 с.

14. **ГОСТ 21559-76.** Материалы магнитотвердые спеченные. Марки, технические требования и методы контроля. – М.: Изд-во стандартов, 1977, 43 с.

15. **Банди Б.** Основы линейного программирования. – М.: Радио и связь, 1989, 176 с.

16. **Алексеева Е.В.** Построение математических моделей целочисленного линейного программирования. Примеры и задачи: Учебное пос. – Новосибирск: Новосибирский государственный университет, 2012, 131 с.

17. **Антипов В.Н., Кручинина И.Ю., Грозов А.Д., Иванова А.В.** Закономерности изменения параметров размерного ряда мини-турбогенераторов для малоразмерных газотурбинных установок. – Электричество, 2013, № 12, с. 51–56.

18. **ГОСТ 21427.2-83.** Сталь электротехническая холоднокатаная изотропная тонколистовая. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 1984, 10 с.

19. **ТУ 14-1-4657-89.** Сталь электротехническая холоднокатаная изотропная тонколистовая марок 2420, 2421 толщиной 0,18 мм. – М.: Стандартинформ, 1989, 5 с.

20. **Стародубцев Ю.Н., Белозеров В.Я.** Магнитные свойства аморфных и нанокристаллических сплавов. – Екатеринбург: Изд. Уральского университета, 2002, 384 с.

21. **ТУ 1261-030-12287107-2007.** Магнитопроводы ленточные кольцевые ГАММАМЕТ 440В.

[22.02.2017]

*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.*

*Elektrichestvo (Electricity), 2017, No. 7, pp. 38–46*

*DOI:10.24160/0013-5380-2017-7-38-46*

## Selecting the Magnetic and Ferromagnetic Materials for High-Speed Mini Turbine Generators

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

**GROZOV Andrei 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 studying the parameters of high-speed mini turbine generators as functions of the characteristics of applied materials, namely, high-coercive magnets and ferromagnetic materials of the stator core. It has been found from a numerical experiment that the volume of magnets has a noticeable effect on the copper and steel losses, on the generator efficiency, and on its total mass. Up to 50% reduction of losses can be achieved by properly choosing the electrical steel characteristics. The advantages of the four-pole design of a mini turbine generator are obtained only in case of using an amorphous or a nanocrystalline alloy, as a result of which the machine weight is decreased by a factor of 2 and its efficiency is increased by 2%. A procedure for estimating the parameters of mini turbine generators is proposed, central to which is searching for the optimal solution of a linear programming problem. The objective function coefficients have been determined from a numerical experiment. The assessment error in using the proposed procedure does not exceed 2%. The procedure is applicable for the standard sizes of mini turbine generators.*

**Key words:** *high-speed mini turbine generator, choice of magnetic materials, linear programming, permanent magnet, electrical steel*

### REFERENCES

1. **Danilevich Ya.B., Antipov V.N., Kruchinina I.Yu., Khozikov Yu.F.** *Turbogeneratory maloi moshchnosti dlya detsentralizovannykh sistem 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.

2. **Ledovskii A.N.** *Elektricheskiye mashiny s vysokoeffektivnymi postoyannymi magnitami* (Electrical machines with high-effective permanent magnets). Moscow, Energoatomizdat, 1985, 168 p.