

Закономерности изменения параметров размерного ряда турбогенераторов для децентрализованной энергетики

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

Исследованы закономерности размерного ряда синхронных машин с постоянными магнитами, используемых как турбогенераторы в децентрализованной энергетике. Изучены различные соотношения между электромагнитными нагрузками, геометрическими размерами, параметрами статорной обмотки и постоянных магнитов. Выполнено сравнение с реальными проектами и установлены оптимальные закономерности для размерного ряда машин. Проведенные исследования будут полезны при проектировании турбогенераторов газотурбинных установок. Делается вывод о том, что размерный ряд турбогенераторов при одинаковой номинальной частоте вращения целесообразно выполнять с неизменными значениями индукции и плотности тока обмотки статора.

Ключевые слова: турбогенераторы, постоянные магниты, размерный ряд, изменение параметров, газотурбинные установки

Производство электрической и тепловой энергии с высоким КПД на месте потребления с помощью автономных теплоэлектростанций или когенерационных установок является энергосберегающей технологией и соответствует требованиям современной энергетики. В связи с этим возрастает интерес к разработке серий как высокооборотных синхронных мини-генераторов с возбуждением от постоянных магнитов мощностью до 200 кВт с частотой вращения до 100000 мин⁻¹ [1–3], так и синхронных генераторов 2,5–10 МВт (3000–12000) мин⁻¹ [3, 4]. Мини-турбогенераторы могут использоваться в качестве автономных источников электроснабжения, резервных источников в случае природных катаклизмов и аварийных ситуаций, а также в системах автоматического управления оборудованием при нефте- и газодобыче, бурении скважин для геологоразведки, диагностики и мониторинга окружающей среды. В [5, 6] рассмотрены закономерности изменения параметров размерного ряда таких мини-турбогенераторов при снижении номинальной частоты вращения с повышением мощности. Синхронные генераторы мощностью 2,5–10 МВт выполняются на одинаковую номинальную частоту вращения. Типичными являются ТЭЦ с двумя и четырьмя газотурбинными агрегатами при электрической мощности каждой турбины 9 МВт, причем частота вращения турбины 6000 мин⁻¹, а генератора 3000 мин⁻¹ [7]. По нашим оценкам, перспективным турбогенератором для децентрализованной энергетики является высокооборотный турбогенератор с возбуждением от постоянных магнитов частотой вращения 6000–12000 мин⁻¹ [3, 4].

Статья продолжает работу [6], в ней рассмотрены закономерности построения размерного ряда турбогенераторов с одинаковой номинальной час-

тотой вращения для децентрализованной энергетики. Общий подход к рассмотрению базируется на [8], т.е. полагается, что диаметр, активная длина и мощность машины изменяются по законам:

$$D_j = a^{(j-m)} D_m; \quad (1)$$

$$L_{jk} = a^{(j-m)} b^{(k-n)} L_{mn}; \quad (2)$$

$$P_{jk} = a^{4(j-m)} b^{(k-n)} P_{mn}, \quad (3)$$

где j – индекс нарастания внутреннего диаметра статора; k – индекс нарастания активной длины машины; $a = 1,12$, $b = 1,25$ – знаменатели геометрических прогрессий рядов предпочтительных чисел $R20$ и $R10$ нарастания диаметра статора и активной длины; m , n – индексы базовой машины, в дальнейшем исследовании принято $m = 1$, $n = 1$.

Рассматривая размерный ряд турбогенераторов, будем полагать, что машины выполняются на одно и то же напряжение и имеют одинаковое число пар полюсов и параллельных ветвей:

$$U_{jk} = \text{const}; \quad 2p_{jk} = \text{const}. \quad (4)$$

При условии постоянства частоты вращения $n_j = \text{const}$ с увеличением мощности и габарита для размерного ряда можно найти закономерности изменения номинальных данных, обмоточных данных и геометрических размеров, которые представлены в табл. 1.

В табл.1 показаны закономерности изменения номинальных данных: мощности P_{jk} , напряжения U_{jk} , тока I_{jk} , частоты вращения n_{jk} и электромагнитной постоянной Арнольда C_{ajk} ; электромагнитных нагрузок: линейной нагрузки A_{jk} , магнитного потока F_{jk} и плотности тока J_{ajk} ; обмоточ-

Таблица 1

Номинальные данные	
P_{jk} / P_{mn}	$a^{4(j-m)}b^{(k-n)}$
I_{jk} / I_{mn}	$a^{4(j-m)}b^{(k-n)}$
U_{jk} / U_{mn}	const
n_{jk} / n_{mn}	const
C_{ajk} / C_{amn}	$a^{-(j-m)}$
Электромагнитные нагрузки	
A_{jk} / A_{mn}	$\frac{B_{dmn}}{B_{djk}} a^{2(j-m)} = \frac{w_{jk}}{w_{mn}} a^{2(j-m)} b^{k-n}$
F_{jk} / F_{mn}	$\frac{B_{djk}}{B_{dmn}} a^{2(j-m)} b^{k-n} = \frac{w_{mn}}{w_{jk}}$
j_{ajk} / j_{amn}	$a^{2(j-m)} b^{k-n} \frac{b_{pmn}}{b_{jk}}$
Обмоточные данные	
w_{jk} / w_{mn}	$\frac{B_{dmn}}{B_{djk}} a^{-(j-m)} b^{-(k-n)}$
Z_{jk} / Z_{mn}	$\frac{t_{zmn} \cdot b_{zmn} \cdot \frac{B_{djk}}{B_{dmn}} \cdot \frac{B_{zmn}}{B_{zjk}}}{b_{pmn}} \cdot \frac{j_{ajk}}{j_{amn}} a^{2(j-m)} b^{-(k-n)}$
N_{jk} / N_{mn}	$\frac{B_{dmn}}{B_{djk}} \cdot \frac{j_{amn}}{j_{ajk}} \cdot \frac{b_{pmn}}{t_{zmn} \cdot b_{zmn} \cdot \frac{B_{djk}}{B_{dmn}} \cdot \frac{B_{zmn}}{B_{zjk}}}$
Геометрические размеры статора	
D_{jk} / D_{mn}	$a^{(j-m)}$
L_{jk} / L_{mn}	$a^{(j-m)} b^{(k-n)}$
b_{pjk} / b_{pmn}	$a^{2(j-m)} b^{(k-n)} \frac{j_{amn}}{j_{ajk}}$
h_{pjk} / h_{pmn}	$a^{-(j-m)}$
b_{zjk} / b_{zmn}	$a^{(j-m)} \frac{Z_{mn}}{Z_{jk}} \frac{B_{zmn}}{B_{jk}} \frac{B_{djk}}{B_{dmn}}$
t_{zjk} / t_{zmn}	$a^{(j-m)} \frac{Z_{mn}}{Z_{jk}}$
Геометрические размеры магнитов	
L_{mjk} / L_{mmn}	$a^{(j-m)} b^{(k-n)}$
h_{mjk} / h_{mmn}	$a^{(j-m)}$
b_{mjk} / b_{mmn}	$a^{(j-m)}$

ных данных: числа витков на полюс и фазу w_{jk} , числа зубцов статора Z_{jk} , числа эффективных проводников в пазу статора N_{jk} ; геометрических размеров: диаметра расточки и активной длины статора D_j и L_{jk} , высоты и ширины паза статора h_{pjk} , b_{pjk} , ширины зубца и зубцового деления статора b_{zjk} , t_{zjk} ; геометрических размеров магнитов: длины L_{mjk} , высоты h_{mjk} и ширины b_{mjk} .

По сравнению с размерным рядом для высокоскоростных мини-турбогенераторов закономерности изменения электромашиной постоянной Арнольда, магнитного потока, линейной нагрузки и числа витков на полюс и фазу имеют иной характер.

Изменение основных номинальных данных и геометрических размеров для размерного ряда двухполюсных турбогенераторов показаны на рис. 1, ниже приведены их численные значения (за базовую машину принят турбогенератор 2000 кВт, 6300 В, 3000 мин⁻¹):

D , м	L , м	P , кВт	I , А	C_a , мм ³ ·мин ⁻¹ /В·А
0,590	2,000	2000	400	880000
0,590	2,500	2500	500	880000
0,664	2,250	3204	641	780000
0,664	2,813	4005	801	780000
0,747	2,531	5132	1026	690000
0,747	3,164	6414	1283	690000
0,840	2,848	8220	1644	620000
0,840	3,560	10275	2055	620000

В табл. 2 представлены данные двухполюсных генераторов, применяемых в газотурбинных установках ОАО «Рыбинские моторы» НПО «Сатурн» (напряжение линейное 6,3/10,5 кВ, частота вращения 3000 мин⁻¹), которые показывают полное соответствие размерного ряда с практическими результатами.

Таблица 2

Параметр	ГТЭС-2,5	ГТА-6РМ	ГТА-8РМ	ГТА10РМ
Марка генератора	ТК-2,5-2РУХЛЗ	ТК-6-2РУХЛЗ	ТК-8-2РУХЛЗ	ТК-8-2РУХЛЗ
Мощность S_1 , МВт	2,5	6,0	8,0	10,0
Максимальная мощность S_2 (60 мин), МВт	3,0	7,2	9,6	11,0
Ток номинальный, А	286/171	687/412	916/550	1145/687



Рис. 1. Закономерности изменения номинальных параметров (а) и основных геометрических размеров (б) соразмерного ряда

Полученные в табл. 1 выражения для изменения электромагнитных величин и обмоточных данных связаны с характером изменения плотности тока и индукции в воздушном зазоре и зубцах статора. Проанализируем закономерности размерного ряда для двух случаев:

индукция в воздушном зазоре и зубцах статора, а также плотность тока остаются постоянными для соразмерного ряда:

$$B_d = \text{const}; B_z = \text{const}; j_a = \text{const}; \quad (5)$$

индукция в воздушном зазоре и зубцах статора, а также плотность тока для соразмерного ряда возрастают с увеличением габарита и подчиняются закономерности:

$$\frac{B_{djk}}{B_{dmn}} = a^{0,5(j-m)}; \frac{B_{zjk}}{B_{zmn}} = a^{0,5(j-m)}; \frac{j_{ajk}}{j_{amn}} = a^{j-m}. \quad (6)$$

Полученные закономерности для высокоскоростных синхронных генераторов с постоянными магнитами в случае исполнения соразмерного ряда для двух значений длины статора в габарите $a = 1,125$ и $b = 1,25$, наиболее характерном для тур-

богенераторов, применяемых в газотурбинных установках децентрализованной энергетики, представлены на рис. 2–4.

Закономерности на рис. 2–4 справедливы для генераторов с любым значением номинальной частоты вращения.



Рис. 2. Закономерности изменения электромагнитных параметров размерного ряда: а – для случая (5); б – для случая (6)

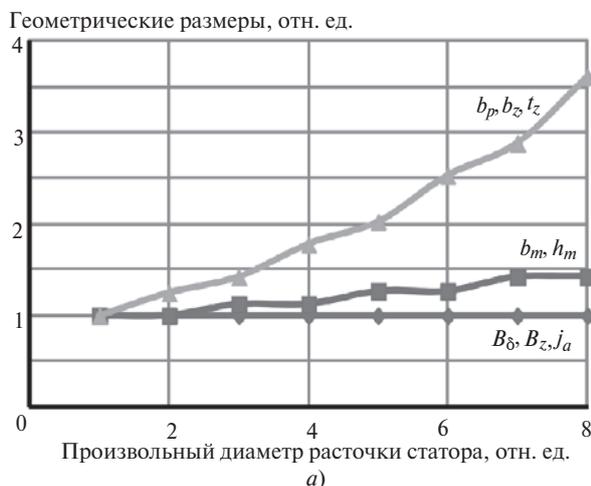


Рис. 4. Закономерности изменения геометрических размеров соразмерного ряда: а – для случая (5); б – для случая (6)



Рис. 3. Закономерности изменения обмоточных данных соразмерного ряда: а – для случая (5); б – для случая (6)

В Институте химии силикатов РАН разработан проект высокоскоростного турбогенератора (СГПМ-6-12000) для децентрализованной энергетики 6 МВт, 12000 мин⁻¹, имеющий повышенные технико-экономические показатели. Сравнение с традиционным турбогенератором ТК-6-2РУХЛЗ приведено в табл. 3.

Таблица 3

Параметр	ТК-6-2РУХЛЗ	СГПМ-6-12000
Мощность, кВт	6000	6000
Напряжение, В	6300	6300
Частота вращения, мин ⁻¹	3000	12000
КПД, %	97,4	98,0
Масса, кг	20040	4780
Уд.масса, кг/кВт	3,34	0,8

Расчетные данные высокоскоростного турбогенератора сопоставлены с закономерностями размерного ряда при условиях (5) и (6) в табл. 4.

Сопоставление подтверждает целесообразность построения размерного ряда турбогенераторов для децентрализованной энергетики при условии постоянства плотности тока и значений индукции в зубцах и воздушном зазоре: $B_d = \text{const}$; $B_z = \text{const}$; $j_a = \text{const}$.

Разработка высокоскоростных турбогенераторов для децентрализованной энергетики, являясь актуальной задачей, требует комплексного подхода при расчетно-проектных и материаловедческих исследованиях. Эти данные могут служить основой для проектирования размерного ряда высокоскоростных турбогенераторов для децентрализованной энергетики.

Закономерности изменения номинальных, обмоточных данных, электромагнитных нагрузок и геометрических размеров размерного ряда турбогенераторов для децентрализованной энергетики при $B_d = \text{const}$, $B_z = \text{const}$, $j_a = \text{const}$, $n_{jk} = 12000$ мин⁻¹ приведены в табл. 5 и 6.

Таблица 4

Данные	Условие (5)	Условие (6)	Расчет
Φ , мВб	400,5	450,5	394
A , А/см	405	455,6	451
W	6	5,3	6
Z	36	45,5	36
N	4	2,8	4
B_d , Тл	0,5	0,563	0,47
B_z , Тл	105	1,69	1,35
j_a , А/мм ²	4,4	5,57	4,36
t_z , мм	32,9	26,0	27,0
b_z , мм	17,7	14	14,4
b_p , мм	15,2	12	12,6
h_p , мм	65,8	65,8	65,5
l_m , мм	2136	2136	2100
b_m , мм	303,8	303,8	354
h_m , мм	30,4	30,4	30

Вывод. Представленные в статье общие закономерности изменения номинальных данных и основных геометрических размеров размерного ряда электрических машин могут быть использованы для турбогенераторов газотурбинных установок. Размерный ряд турбогенераторов при одинаковой номинальной частоте вращения целесообразно выполнять с неизменными значениями индукций и плотности тока обмотки статора.

Таблица 5

j	k	P , кВт	I , А	Φ , мВб	A , А/см	B_d , Тл	j , А/мм ³	B_z , Тл	w	N	Z
1	1	2000	400	200	320	0,5	4,4	1,5	12,0	4	72,0
1	2	2500	500	250	320	0,5	4,4	1,5	9,6	4	57,6
2	1	3204	640,7	253,1	360	0,5	4,4	1,5	9,5	4	56,9
2	2	4005	800,9	316,4	360	0,5	4,4	1,5	7,6	4	45,5
3	1	5132	1026,3	320,4	405	0,5	4,4	1,5	7,5	4	44,9
3	2	6414	1282,9	400,5	405	0,5	4,4	1,5	6,0	4	36,0
4	1	8220	1644,0	405,5	455,6	0,5	4,4	1,5	5,9	4	35,5
4	2	10275	2054,9	506,8	455,6	0,5	4,4	1,5	4,7	4	28,4

Таблица 6

j	k	D , м	$L = l_m$, м	h_p , мм	b_p , мм	b_z , мм	t_z , мм	b_m , мм	h_m , мм
1	1	0,250	1,350	52,0	6,0	7,0	13,0	240	24
1	2	0,250	1,688	52,0	7,5	8,8	16,3	240	24
2	1	0,281	1,519	58,5	8,5	10,0	18,5	270	27
2	2	0,281	1,898	58,5	10,7	12,5	23,1	270	27
3	1	0,316	1,709	65,8	12,2	14,2	26,4	303,8	30,4
3	2	0,316	2,136	65,8	15,2	17,7	32,9	303,8	30,4
4	1	0,356	1,922	74,0	17,3	20,2	37,5	341,7	34,2
4	2	0,356	2,403	74,0	21,6	25,3	46,9	341,7	34,2

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. Наука и образование, 2011, №4, с. 41–51.

2. Пожидаев В.М. Микротурбинные электроагрегаты – новое направление в малой энергетике. – Академия энергетики, 2005, №4, с. 26–33.

3. Данилевич Я.Б., Антипов В.Н., Кручинина И.Ю. и др. Турбогенераторы малой мощности для децентрализованных систем энергообеспечения. – СПб: Наука, 2009, 102 с.

4. Данилевич Я.Б., Антипов В.Н., Кручинина И.Ю. и др. Перспективный турбогенератор для децентрализованной (локальной) энергетики. – Изв. РАН. Энергетика, 2009, №4, с. 89–97.

5. Antipov V.N., Kruchinina I.Yu., Grozov A.D., Ivanova A.V. Size Spectrum Investigation of Mini Turbogenerators for Gas Turbine Units. – Proc. of the XXth Intern. Conf. on Electrical Machines. Marseille (France), 2012. – CD-ROM. – PID2412641.

6. 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.

7. Хуторецкий Г.М., Андреева А.В., Дроздова Л.А., Косачевский В.И. Турбогенератор 10 МВт, 3000 об/мин для газотурбинной ТЭЦ малой энергетики. – Проблемы создания и эксплуатации новых типов энергетического оборудования. – СПб: ОЭЭП РАН, 2004, вып. 6, с. 22–32.

8. Гурин Я.С., Кузнецов Б.И. Проектирование серий асинхронных двигателей. – М.: Энергия, 1978, 479 с.

[22.10.13]

А в т о р ы : Антипов Виктор Николаевич окончил электромеханический факультет Ленинградского политехнического института (ЛПИ) в 1963 г. Защитил докторскую диссертацию «Обеспечение заданных коммутационных качеств при проектировании машин постоянного тока промышленного назначения» в 1989 г. Ведущий научный сотрудник лаборатории химической энергетики и экологии Института химии силикатов имени И.В. Гребенщикова РАН (ИХС РАН).

Грозов Андрей Дмитриевич окончил электромеханический факультет ЛПИ в 1979 г. Научный сотрудник лаборатории химической энергетики и экологии ИХС РАН.

Иванова Анна Владимировна окончила математико-механический факультет Ленинградского государственного университета 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 лаборатории химической энергетики и экологии ИХС РАН.

Studying the Regularities Pertinent to Variation of the Turbine Generator Size Series for Decentralized Power Supply Systems

V. N. ANTIPOV, A.D. GROZOV and A.V. IVANOVA

Regularities pertinent to the size series of permanent-magnet synchronous machines used as turbine generators in decentralized power supply systems are investigated. Various correlations between electromagnetic loads, geometrical parameters, and parameters of the stator winding and permanent magnets are studied. A comparison with real projects is carried out and the optimal regularities for the machine size series are determined. The obtained investigations will be useful in designing the turbine generators of gas turbine units. A conclusion is drawn according to which it is advisable to design the size series of turbine generators having the same nominal rotation frequency with the same values of induction and stator winding current density.

Key words: turbine generators, permanent magnets, size series, variation of parameters, gas turbine units

REFERENCES

1. Rassokhin V.A., Zabelin N.A., Matveyev Yu.V. Nauchno-Tekhnicheskie vedomostu SPb GPU. (Scientific-Technical Lists SPbGPU), 2011, № 4, pp. 41–51.
2. Pozhidayev V.M. Akademiyaenergetiki. (Energy Academy), 2005, № 4, pp. 26–33.
3. Danilevich Ya.B., Antipov V.N., Kruchinina I. Yu. et.al. Turbogeneratory maloi moshchnosti dlya detsentralizovannykh system energoobespecheniya (). SPb. Nauka, 2009, 102 p.
4. Danilevich Ya.B., Antipov V.N., Kruchinina I. Yu. et. al. Izv. RAN. Energetika (News RAS. Energy), 2009, № 4, pp. 89–97.
5. Antipov V.N., Kruchinina I. Yu., Grozov A.D., Ivanova A.V. Size Spectrum Investigation of Mini Turbogenerators for Gas Turbine Units. Proc. of the XX Intern. Conf. on Electrical Machines. Marseille (France), 2012. – CD-ROM. – PID2412641.
6. Antipov V.N., Kruchinina I. Yu., Grozov A.D., Ivanova A.V. Elektrichestvo (Electricity), 2013, № 12. pp. 51–56.
7. Khutoretskii G.M., Andreyeva A.V., Drozdova L.A., Kosachevskii V.I. SPb. OEEP RAS, 2004, issue 6, pp. 22–32.
8. Gurin Ya.S., Kuznetsov B.I. Proektirovaniye serii asinkhronnykh dvigatelei (). Moscov. Energiya, 1978, 479 p.

Authors: Viktor Nikolaevich Antipov graduated from the Leningrad Polytechnic Institute (LPI) in 1963. In 1989 he received the degree of Doctor Techn. Sci. He is a leading scientific researcher in the Institute for the Chemistry of Silicates of the Russian Academy of Sciences (IChS RAS).

Andrei Dmitriyevich Grozov graduated from LPI in 1979. He is a scientific researcher from IChS RAS.

Anna Vladimirovna Ivanova graduated the Leningrad State University in 1979. In 1989 she received the degre of Cand. Techn.Sci. She is a senior scientific researcher from IChS RAS.