

Закономерности изменения параметров размерного ряда мини-турбогенераторов для малоразмерных газотурбинных установок

АНТИПОВ В.Н., КРУЧИНИНА И.Ю., ГРОЗОВ А.Д., ИВАНОВА А.В.

Рассматривается размерный ряд высокоскоростных синхронных машин с постоянными магнитами, используемых как генераторы в малоразмерных газотурбинных установках. Изучены различные соотношения между электромагнитными нагрузками, машин ряда, геометрическими размерами, параметрами статорной обмотки и постоянных магнитов. Выполнено сравнение с реальными проектами и установлены оптимальные закономерности для размерного ряда машин. Установленные закономерности будут полезны при проектировании высокоскоростных мини-турбогенераторов.

Ключевые слова: мини-турбогенераторы, газотурбинные установки, размерный ряд, оптимизация параметров

Повышение технологичности электрических машин в условиях массового производства достигнуто путем их серийного изготовления. Серия электрических машин характеризуется: стройно нарастающими основными параметрами – мощностью и геометрическими размерами; общностью назначения и условиями работы; принципиально подобной конструкцией; электрическими и конструктивными модификациями. Серия состоит из отдельных типоразмеров, под которыми понимаются электрические машины с определенными параметрами и монтажно-присоединительными размерами. В 1970-х годах для общепромышленных электродвигателей были унифицированы и стандартизированы основные параметры и установочно-присоединительные размеры [1]. Публикация МЭК-60072-1 [2, 3] установила для вращающихся электрических машин взаимосвязь между номинальной мощностью и установочно-присоединительными размерами. За базовый параметр принят габарит (или высота оси вращения) – величина, однозначно связанная с внутренним диаметром статора D_j .

На рубеже XXI в. для автономного производства как тепла, так и электричества появилось современное оборудование – малоразмерные газотурбинные установки, надежные, экологически чистые (низкий уровень выбросов в окружающую среду) и низкочастотные в монтаже, обслуживании и эксплуатации источники энергии мощностью до

A standard series of high-speed permanent-magnets synchronous machines is considered that are used as generators in small-size gas turbine units. Various correlations between electromagnetic loads, geometrical sizes, stator winding parameters, and permanent magnets in the machines of this series are studied. A comparison is made with real projects, and the optimal regularities for the standard series of machines are established. The established regularities will be useful in designing high-speed mini turbine generators.

Key words: mini turbine generators, gas turbine units, standard series, optimization of parameters

100 кВт и более [4–7]. Для малоразмерных газотурбинных установок перспективным высокоскоростным мини-турбогенератором является синхронная машина с возбуждением от постоянных высококоэрцитивных магнитов нового поколения [8–19] с частотой вращения до 100000 мин⁻¹ и диапазоном мощности от 15 до 250 кВт.

Рассмотрим соразмерный ряд таких генераторов, включающий m габаритов и n длин машин в каждом габарите. Обозначим произвольно выбранный габарит индексом j , а произвольно выбранную длину индексом k . В этом случае любой параметр машины, входящей в соразмерный ряд, может быть представлен элементом матрицы. Например, для мощности матрица будет иметь вид:

$$\begin{matrix} \hat{e} P_{11} & K & P_{j1} & K & P_{m1} & \hat{u} \\ \hat{e} P_{1k} & K & P_{jk} & K & P_{mk} & \hat{u} \\ \hat{e} P_{1n} & K & P_{jn} & K & P_{mn} & \hat{u} \end{matrix}$$

Обозначим отношение двух соседних диаметров (двух соседних длин) $b = L_{jk} / L_{j(k-1)}$, отношение мощностей $c = P_{jk} / P_{j(k-1)}$ будет пропорционально отношению диаметров в четвертой степени.

Основные закономерности построения ряда следующие:

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

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

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

Рассматривая соразмерный ряд высокоскоростных мини-турбогенераторов, в котором с увеличением мощности снижается частота вращения, будем полагать, что генераторы выполняются на одно и то же напряжение и имеют одинаковое число пар полюсов и параллельных ветвей обмотки статора ($U_{jk} = 1 = \text{const}$; $2p_{jk} = 1 = \text{const}$; $a_{jk} = 1 = \text{const}$). В этом случае закономерность изменения тока статора будет повторять закономерность изменения мощности:

$$I_{jk} = a^{4(j-m)} b^{(k-n)} I_{mn}. \quad (4)$$

Если в качестве механического ограничения принять допустимую окружную скорость ротора $V_{rm} = \rho D / 60$, то частота вращения генератора будет подчиняться закономерности

$$n_j = a^{-(j-m)} n_m. \quad (5)$$

Закономерность изменения частоты электромагнитного поля будет аналогичной, поскольку число пар полюсов соразмерного ряда не меняется:

$$f_j = a^{-(j-m)} f_m. \quad (6)$$

Электромашинная постоянная Арнольда пропорциональна квадрату диаметра расточки статора, активной длине и частоте вращения и обратно пропорциональна расчетной мощности P_{jk} , т.е. характеризуется зависимостью

$$C_{ajk} \propto \frac{D_{jk}^2 L_{jk} n_{jk}}{P_{jk}}. \quad (7)$$

После подстановки (1)–(3) и (5) в (7), полагая неизменным коэффициент мощности, получим закономерность изменения постоянной Арнольда, которая характеризует степень использования машины:

$$C_{ajk} = a^{-2(j-m)} C_{amn}. \quad (8)$$

Приведенные закономерности являются общими для построения соразмерного ряда электрических машин. Логично принять допущение, что геометрические размеры машины, связанные с диаметром расточки статора (высота паза h_p и ширина магнитов b_m), изменяются так же, как и диаметр, а длина магнита подчиняется закономерности изменения активной длины машины. Полученные закономерности:

номинальные данные

$$P, I \propto a^{4(j-m)} b^{(k-n)}$$

$U \text{ const}$

$$C_a \propto a^{-2(j-m)}$$

$$n, f \propto a^{-(j-m)}$$

геометрические размеры

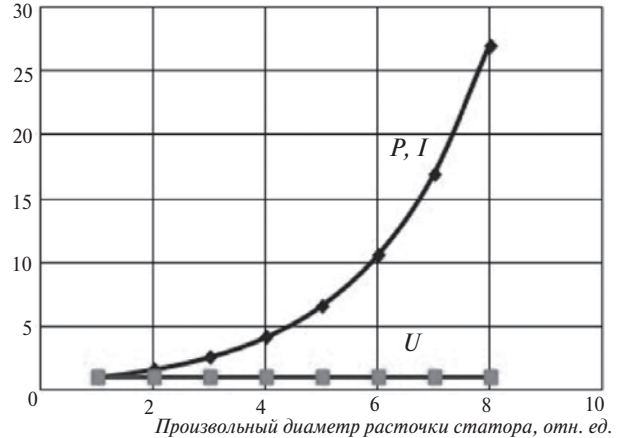
$$D, h_p, b_m \propto a^{(j-m)}$$

$$L, l_m \propto a^{(j-m)} b^{(k-n)}$$

показаны на рис. 1, где зависимости построены для случая исполнения соразмерного ряда на одной длине статора в габарите, как наиболее характерного для мини-турбогенераторов малоразмерных газотурбинных установок.

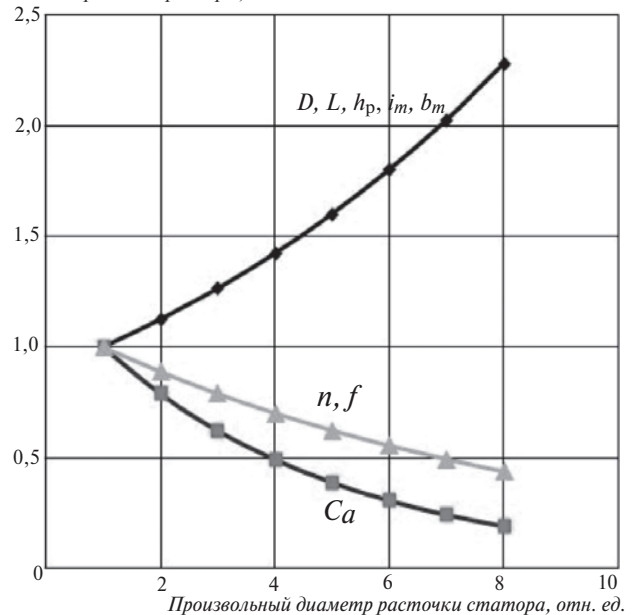
На рис. 2 эти закономерности сопоставлены с номинальными данными и геометрическими размерами высокоскоростных электрических машин фирмы Calnetix [7], приведенными в табл. 1. Соразмерный ряд построен по параметрам базовой машины RSS-12-115-1.

Номинальные данные, отн. ед.



а)

Геометрические размеры, отн. ед.



б)

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

Таблица 1

Тип машины	Параметр			
	P , кВт	n , мин ⁻¹	D_1 , мм	L_1 , мм
RSS-12-115-1	12	115000	37,6	56,9
RSS-26-84-1	26	84000	44,5	92,9
RSS-100-60-1	100	60000	72,9	171,5

Закономерности изменения электромагнитных нагрузок, обмоточных данных и геометрии зубцового слоя зависят от того, какие закономерности изменения значений индукции и плотности тока приняты при проектировании. Цель дальнейшего исследования – выяснить, какие же закономерности оптимальны.

В общем виде можно получить следующие зависимости.

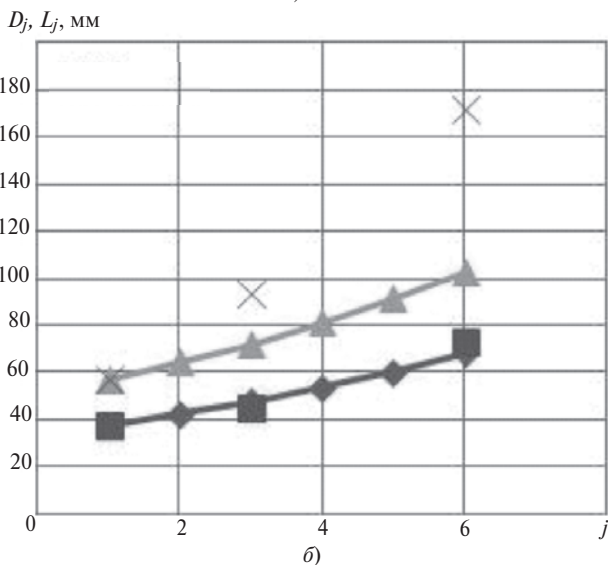
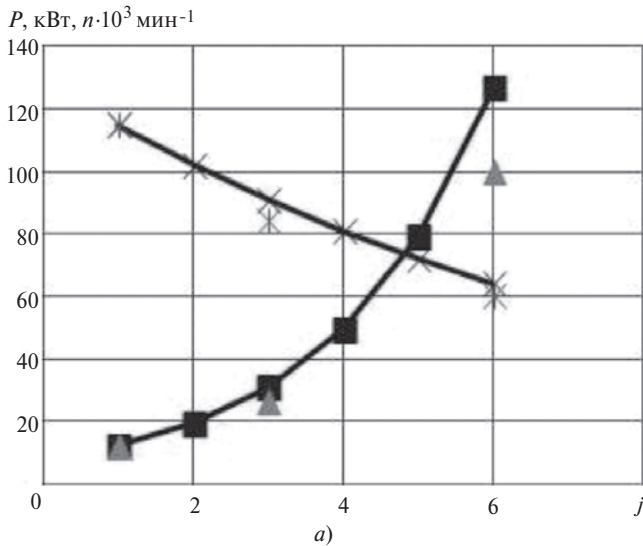


Рис. 2. Сравнение номинальных параметров (а) и геометрических данных (б) серии RSS фирмы Calnetix с основными закономерностями соразмерного ряда

Магнитный поток электрической машины при принятых нами допущениях обратно пропорционален частоте электромагнитного поля и числу витков на полюс и фазу; с другой стороны, известна зависимость магнитного потока от индукции в воздушном зазоре, следовательно, для соразмерного ряда

$$\frac{w_{jk}}{w_{mn}} = \frac{B_{dmn}}{B_{djk}} a^{-(j-m)} b^{-(k-n)}. \quad (9)$$

Линейная нагрузка пропорциональна току, числу витков и обратно пропорциональна диаметру расточки статора:

$$A_{jk} \propto \frac{I_{jk} w_{jk}}{D_j}. \quad (10)$$

Учитывая (1), (4) и (9), получаем для линейной нагрузки:

$$\frac{A_{jk}}{A_{mn}} = \frac{B_{dmn}}{B_{djk}} a^{2(j-m)}; \quad \frac{A_{jk}}{A_{mn}} = \frac{w_{jk}}{w_{mn}} a^{2(j-m)} b^{(k-n)}. \quad (11)$$

Плотность тока в обмотке статора

$$j_{jk} = \frac{I_{jk}}{b_{pjk} h_{pjk}} = j_{mn} a^{3(j-m)} b^{(k-n)} \frac{b_{pmn}}{b_{jk}}.$$

Получим соотношения, связывающие плотность тока и ширину паза статора:

$$\frac{j_{jk}}{j_{mn}} = a^{2(j-m)} b^{(k-n)} \frac{b_{pmn}}{b_{jk}}; \quad (12)$$

$$\frac{b_{pjk}}{b_{pmn}} = a^{2(j-m)} b^{(k-n)} \frac{j_{pmn}}{j_{ajk}}. \quad (13)$$

Представив математическую связь между значениями индукции в зубце и воздушном зазоре в виде

$$B_{zjk} = B_{djk} \frac{t_{zjk}}{b_{zjk}} = B_{zmn} a^{(j-m)} \frac{Z_{mn}}{Z_{jk}} \frac{b_{zmn}}{b_{jk}},$$

получим для размеров ширины зубцового деления и зубца закономерности:

$$\frac{t_{zjk}}{t_{zmn}} = a^{(j-m)} \frac{Z_{mn}}{Z_{jk}}; \quad (14)$$

$$\frac{b_{zjk}}{b_{zmn}} = a^{(j-m)} \frac{Z_{mn}}{Z_{jk}} \frac{B_{zmn}}{B_{jk}} \frac{B_{djk}}{B_{dmn}}. \quad (15)$$

Закономерность изменения числа зубцов статора для соразмерного ряда определим из равенства

$$t_{jk} = b_{zjk} + b_{pjk}.$$

Подставляя (15) и (13) в (14), получаем:

$$t_{zjk} = t_{zmn} a^{(j-m)} \frac{Z_{mn}}{Z_{jk}} =$$

$$b_{pmn} \frac{j_{amn}}{j_{ajk}} a^{3(j-m)} b^{(k-n)} + b_{zmn} \frac{B_{dj k}}{B_{dmn}} \frac{B_{zmn}}{B_{zjk}} \cdot a^{(j-m)} \frac{Z_{mn}}{Z_{jk}};$$

$$\frac{Z_{jk}}{Z_{mn}} = \frac{t_{zmn} - b_{zmn} \frac{B_{dj k}}{B_{dmn}} \frac{B_{zmn}}{B_{zjk}}}{b_{pmn}} \cdot \frac{j_{ajk}}{j_{amn}} a^{-2(j-m)} b^{(k-n)}.$$
(16)

Закономерность изменения числа эффективных проводников статора легко определяется с использованием (16) и (9):

$$\frac{N_{jk}}{N_{mn}} = \frac{B_{dmn}}{B_{dj k}} \frac{j_{amn}}{j_{ajk}} a^{(j-m)} \frac{b_{pmn}}{t_{zmn} - b_{zmn} \frac{B_{dj k}}{B_{dmn}} \frac{B_{zmn}}{B_{zjk}}}.$$
(17)

Высота постоянного магнита пропорциональна МДС воздушного зазора и может быть принята равной

$$h_{mjk} = a^{(j-m)} h_{mnn}.$$
(18)

Выражения (10)–(18) в общем виде показывают взаимосвязь закономерностей изменения электромагнитных величин, обмоточных данных и геометрических размеров.

Проанализируем два условия:

значения индукции в воздушном зазоре, зубцах статора и плотность тока остаются постоянными для соразмерного ряда

$$B_d = \text{const}, B_z = \text{const}, j_a = \text{const};$$
(19)

значения индукции в воздушном зазоре, зубцах статора и плотность тока для соразмерного ряда возрастают с увеличением габарита и подчиняются закономерности

$$\frac{B_{dj k}}{B_{dmn}} = a^{0,5(j-m)}; \frac{B_{zjk}}{B_{zmn}} = a^{0,5(j-m)}; \frac{j_{ajk}}{j_{amn}} = a^{(j-m)}.$$
(20)

Полученные закономерности для высокоскоростных синхронных генераторов с постоянными магнитами сведены в табл. 2 для случая исполнения соразмерного ряда на одной длине статора в габарите $a = 1,125$ и $b = 1$, как наиболее характерном

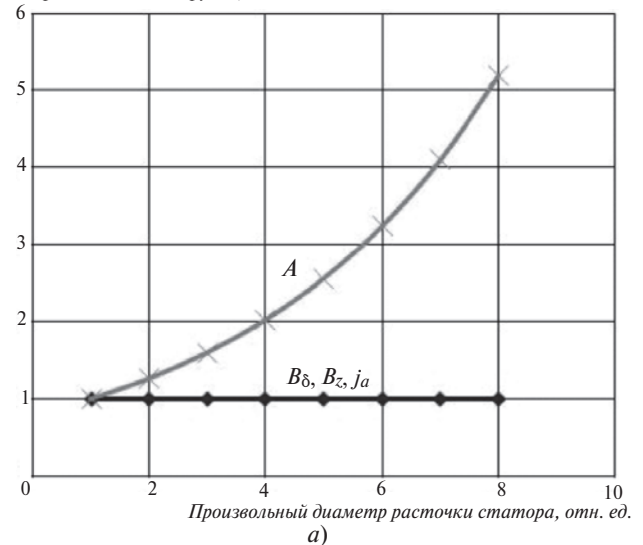
для мини-турбогенераторов малоразмерных газотурбинных установок, и представлены на рис. 3–5 (a – условие (20); b – условие (21)).

Таблица 2

Электромагнитные нагрузки, обмоточные данные, геометрические размеры	Условие (20)	Условие (21)
A	$a^{2(j-m)}$	$a^{2,5(j-m)}$
Φ	$a^{2(j-m)}$	$a^{2,5(j-m)}$
w	$a^{-(j-m)}$	$a^{-1,5(j-m)}$
N	$a^{(j-m)}$	$a^{-0,5(j-m)}$
Z	$a^{-2(j-m)}$	$a^{-1,5(j-m)}$
b_p, b_z, t_z	$a^{2(j-m)}$	$a^{2(j-m)}$

Для оценки закономерностей соразмерного ряда рассчитаны два высокоскоростных мини-турбогенератора 15 кВт, 106000 мин⁻¹ и 100 кВт, 67000 мин⁻¹. Первая машина принята за базовую

Электромагнитные нагрузки, отн. ед.



Электромагнитные нагрузки, отн. ед.

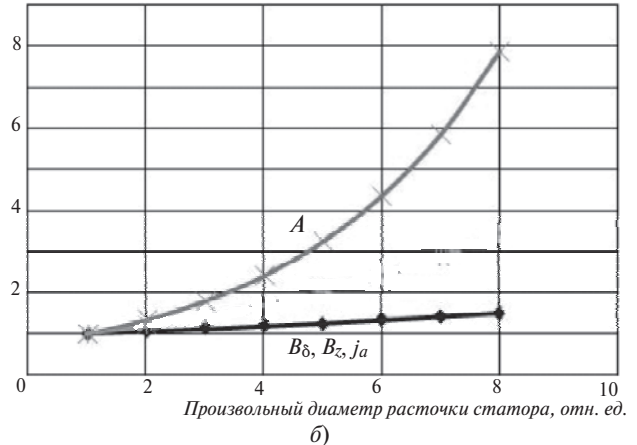


Рис. 3. Закономерности изменения электромагнитных параметров соразмерного ряда

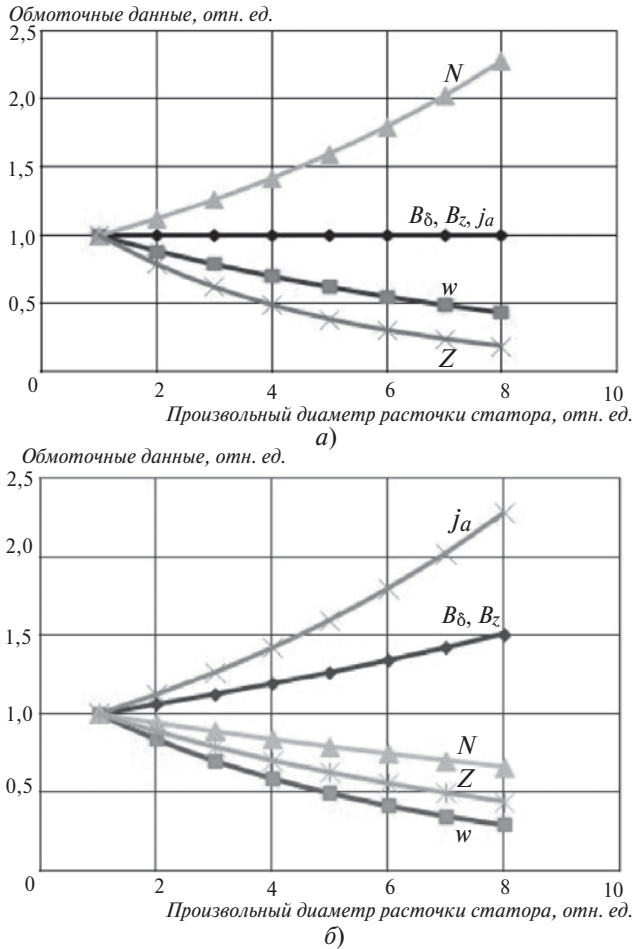


Рис. 4. Закономерности изменения обмоточных данных соразмерного ряда

($D_1 = 44$ мм, $L_1 = 135$ мм, $I = 24,1$ А, $U = 400$ В), по которой определены параметры, соответствующие размерному ряду. Реальные параметры второй машины ($D_1 = 70$ мм, $L_1 = 300$ мм, $I = 160,4$ А, $U = 400$ В) использованы как контрольные для оценки принятых при расчете зависимостей изменения значений индукции и плотности тока. Результаты сопоставления параметров второй машины, полученных численным методом и по предложенным закономерностям, представлены в табл. 3.

Выводы. Общие закономерности изменения номинальных данных и основных геометрических размеров размерного ряда электрических машин могут быть использованы для высокоскоростных мини-турбогенераторов малоразмерных газотурбинных установок.

2. Размерный ряд может быть построен при одинаковом числе пазов ($Z = \text{const}$), но для такого ряда плотность тока обмотки статора будет изменяться по зависимости $\frac{j_{ajk}}{j_{amn}} = a^{2(j-m)}$, т.е. значительно возрастать с ростом габарита, что требует дополнительной оценки теплового состояния машины.

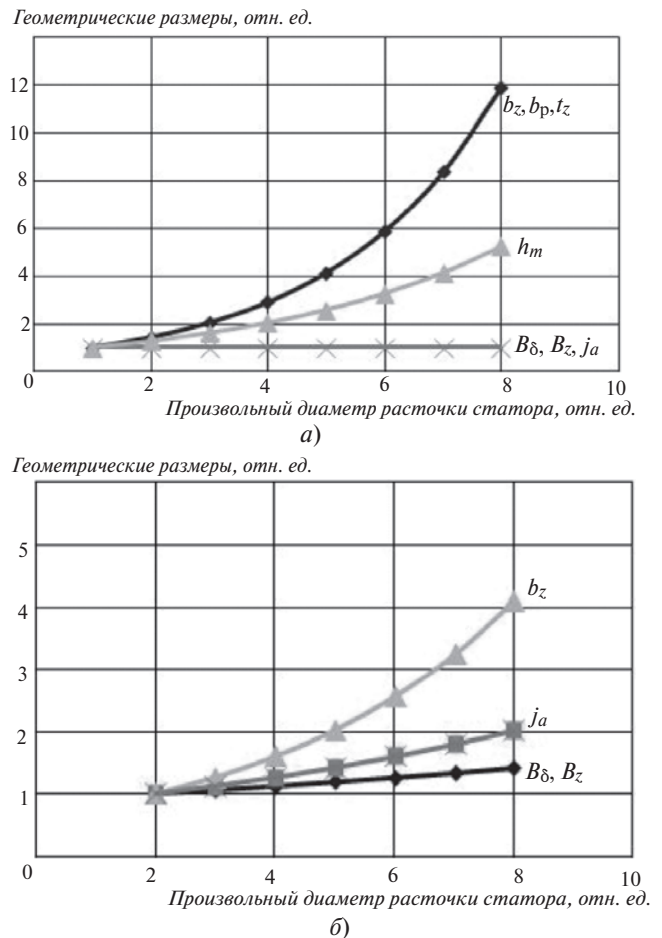


Рис. 5. Закономерности изменения геометрических размеров соразмерного ряда

Таблица 3

Параметр	Базовая машина	Условие (22)	Условие (23)	Расчет
Φ	3,92	10,0	12,7	10,7
A	83,5	214,2	271,2	262,6
W	8	5	4	6
Z	24	9,35	15	18
N	4	6,4	3	4
B_δ	0,64	0,64	0,81	0,66
B_z	1,136	1,136	1,44	1,307
ja	3,85	3,85	6,17	6,56
t_z	5,8	23,8	14,9	12,2
b_z	3,0	12,3	7,7	6,4
b_p	2,9	11,9	7,4	6,6
h_p	9,0	14,4	14,4	14,0
l_m	135	216	216	220
b_m	44,1	70,6	70,6	66,3
h_m	4,0	6,4	6,4	5

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гурин Я.С., Кузнецов Б.И.** Проектирование серий асинхронных двигателей. — М.: Энергоатомиздат, 1978.
2. **IEC 60072-1 - 1991.** Dimensions and output series for rotating electrical machines. Part 1: Frame numbers 56 to 400 and flange numbers 55 to 1080. — International Electrotechnical Commission, 1991.
3. **IEC 60072-2 - 1990.** Dimensions and output series for rotating electrical machines. Part 2: Frame numbers 355 to 1000 and flange numbers 1180 to 2360. — International Electrotechnical Commission, 1990.
4. **Пожидаев В.М.** Микротурбинные электроагрегаты — новое направление в малой энергетике. — Академия энергетике, 2005, № 4(06).
5. **МиниТЭС** на базе газовых турбин производства Capstone Turbine Corporation (США): <http://www.energoprojects.ru>
6. **ТА 100 R СНР 100 кВт.** Микротурбинная установка для комбинированного производства тепла и электроэнергии. Техническое описание. — Elliott Energy Systems Inc.
7. **Calnetix Technologies:** <http://www.calnetix.com>
8. **Данилевич Я.Б., Антипов В. Н., Кручинина И.Ю., Хозиков Ю.Ф.** Турбогенераторы малой мощности для децентрализованных систем энергообеспечения. — СПб: Наука, 2009.
9. **Ситин Д.А.** Магнитные системы синхронных электрических машин с редкоземельными постоянными магнитами повышенной частоты вращения: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М., 2009.
10. **Nagorny A., Dravid N.V., Jansen R.H., Kenny B.H.** Design Aspects of a High Speed Permanent Magnet Synchronous Motor/Generator for Flywheel Application. — NASA/TM-2005-213651.
11. **Gieras J.F., Jonsson U.** Design of a High-Speed Magnet Brushless Generator for Microturbines. — Proc. of XIX Intern. Conf. on Electrical Machines, 2004, Paper 363.
12. **Bianchi N., Bolognani S.** Design Criteria for High-Efficiency SPM Synchronous Motors. — IEEE Trans. Energy Convers., June 2006, vol. 21, № 2, pp. 396–404.
13. **Danilevich Y.B., Antipov V.N.** High-speed (3000-15000 rpm) permanent magnet generator (design and testing). — Book of Abstracts of XVII Intern. Conf. on Electrical Machines (ICEM 2006), Greece, Sept. 2006, pp. 2–5.
14. **Rilla M., Pyrhunen J., Niemelä M., Pekola J.** Design of a 60 kW, 9000 rpm non-salient pole PM-machine. — Proc. of the XVIII Intern. Conf. on Electrical Machines (ICEM-2008), Vilamoura (Portugal), Sept. 2008, Paper ID 921.
15. **Danilevich J.B., Kruchinina I.Yu., Antipov V.N. et al.** Some Problems of the High-Speed Permanent Magnet Mini turbogenerators Development. — Proc. of the XVIII Intern. Conf. on Electrical Machines (ICEM-2008), Vilamoura (Portugal), Sept. 2008, Paper ID 942.
16. **Danilevich J.B., Antipov V.N., Kruchinina I.Yu. et al.** Prospective Permanent Magnet Turbogenerator Design for Local Power Engineering. — Proc. of the XIX Intern. Conf. on Electrical Machines (ICEM–2010), Rome (Italy), Sept. 2010, Paper № 003603.
17. **Kruchinina I.Yu., Antipov V.N., Moskovskaja V.V. et al.** The mini turbogenerator prototype: design and testing. — Proc. of the XIX Intern. Conf. on Electrical Machines (ICEM – 2010), Rome (Italy), Sept. 2010, Paper № 005975.
18. **Paulides J.H., Jewell G.W., Howe D.** An evaluation of alternative stator lamination material for a high-speed, 1,5 MW, permanent magnet generator. — IEEE Trans. on magnetic, July 2004, vol. 40, № 4, pp. 2041–2043.
19. **Dutta R., Rahman M.F.** Design and analysis of an interior permanent magnet (IPM) machine with very wide constant power operation range. — IEEE Trans. on energy conversion, March 2008, vol. 42, № 1, pp. 25–33.

[20.03.13]

А в т о р ы : Антипов Виктор Николаевич окончил электромеханический факультет Ленинградского политехнического института (ЛПИ — 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 лаборатории химической энергетики и экологии Института химии силикатов имени И.В. Гребенщикова РАН (ИХС РАН).

Кручинина Ирина Юрьевна окончила электромеханический факультет ЛПИ в 1984 г. Защитила кандидатскую диссертацию «Поисковые исследования характеристик и свойств специальных типов асинхронных машин с массивным ротором на основе наноматериалов» в 2006 г. Зам. директора по научной работе 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.