

Построение размерного ряда ветрогенераторов для децентрализованной энергетики

АНТИПОВ В.Н.

Исследованы закономерности размерного ряда синхронных машин с постоянными магнитами, применяемых в качестве ветрогенераторов в децентрализованной энергетике. Рассмотрены различные соотношения между электромагнитными нагрузками, геометрическими размерами, параметрами статорной обмотки и постоянных магнитов; выполнено сравнение с реальными проектами. Установленные в статье закономерности построения размерного ряда ветрогенераторов позволяют для одного размера диаметра статора получить девять значений мощности при трех значениях частоты вращения.

Ключевые слова: ветрогенераторы, синхронные машины, постоянные магниты, размерный ряд, оптимизация

Рассмотрение закономерностей построения размерного ряда ветрогенераторов, имеющих одинаковое значение номинальной частоты вращения, базируется на источнике [1], т.е. полагается, что диаметр, активная длина и мощность машины меняются 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 и b — знаменатели геометрических прогрессий рядов предпочтительных чисел $R20$ и $R10$ нарастания диаметра статора и активной длины; m и n — индексы базовой машины, в дальнейшем исследовании принято $m=1$, $n=1$.

Такой размерный ряд можно построить при заданной частоте вращения $n_{jk} = \text{const}$, однако для повышения технологичности машин в условиях массового производства целесообразно построить размерный ряд ветрогенераторов на одном размере диаметра, трех значениях длины и частоты вращения [2, 3], т.е. совместить на одном диаметре три размерных ряда с постоянной частотой вращения. Для совмещенного размерного ряда при заданной активной длине машины и изменении частоты вращения сохраняется неизменным вращающий электромагнитный момент

$$M_j = \text{const}. \quad (4)$$

Рассмотрим размерный ряд, в котором номинальные значения частоты вращения удваиваются

$$n_i = d^{2(i-1)}. \quad (5)$$

Знаменатель геометрической прогрессии $d = \sqrt{2}$; $i=1,2,3$ — текущий индекс частоты вращения; l — индекс базовой машины, в дальнейшем принято $l=1$. В этом случае согласно (4) мощность должна изменяться как

$$P_{jki} = a^{4(j-m)} b^{(k-n)} d^{2(i-l)}. \quad (6)$$

Рассматривая размерный ряд ветрогенераторов на одном размере диаметра, следует положить $a=1$ и принять $b=\sqrt{2}$, а также учесть, что машины выполняются на одно и то же напряжение постоянной частоты и имеют одинаковое число параллельных ветвей:

$$U_{jk} = \text{const}; \quad f_{jk} = \text{const}. \quad (7)$$

Полученные закономерности изменения номинальных и обмоточных данных, а также геометрических размеров размерного ряда ветрогенераторов с постоянными магнитами представлены в табл. 1. Для общности сохранены зависимости от диаметра, во второй колонке представлены формулы для одного диаметра ($a=1$).

В табл. 1 выделены закономерности изменения номинальных данных: номинальной мощности P_{jki} , напряжения U_{jki} , тока I_{jki} , частоты вращения n_{jki} и электромагнитной постоянной Арнольда C_{ajki} ; электромагнитных нагрузок: линейной нагрузки A_{jki} , магнитного потока Φ_{jki} и плотности тока j_{ajki} ; обмоточных данных: числа витков на полюс и фазу w_{jki} , числа зубцов статора z_{jki} , числа эффективных проводников в пазу статора N_{jki} ; геометрических размеров: диаметра расточки и активной длины статора D_j , L_{jk} , высоты и ширины паза статора h_{pjki} , b_{pjki} , ширины зубца и зубцового деления статора b_{zjki} , t_{zjki} ; геометрических размеров магнитов: длины L_{mjki} , высоты h_{mjki} и ширины b_{mjki} .

Таблица 1

Номинальные данные		
P_{jki} / P_{mnl}	$a^{4(j-m)} b^{(k-n)} d^{2(i-l)}$	$b^{(k-n)} d^{2(i-l)}$
I_{jki} / I_{mnl}	$a^{4(j-m)} b^{(k-n)} d^{2(i-l)}$	$b^{(k-n)} d^{2(i-l)}$
U_{jkl} / U_{mnl}	const	const
n_{jki} / n_{mnl}	$n_i = d^{2(i-l)}$	$n_i = d^{2(i-l)}$
C_{afki} / C_{aml}	$a^{-(j-m)}$	const
Электромагнитные нагрузки		
A_{jki} / A_{mnl}	$\frac{B_{dmnl}}{B_{djk}} a^{(j-m)}$	$\frac{B_{dmnl}}{B_{djk}}$
Φ_{jki} / Φ_{mnl}	$\frac{B_{djk}}{B_{dmn}} a^{2(j-m)} b^{(k-n)} \cdot d^{2(i-l)} = \frac{B_{mn}}{B_{jk}}$	$\frac{B_{djk}}{B_{dmn}} b^{(k-n)} \cdot d^{2(i-l)} = \frac{B_{mn}}{B_{jk}}$
j_{ajki} / j_{amnl}	$a^{(j-m)} d^{2(i-l)} = \frac{b_{pmnl} B_{mnl}}{b_{pjki} B_{jki}}$	$d^{2(i-l)} = \frac{b_{pmnl} B_{mnl}}{b_{pjki} B_{jki}}$
Обмоточные данные		
w_{jki} / w_{mnl}	$\frac{B_{dmnl}}{B_{djk}} a^{-2(j-m)} \cdot b^{-(k-n)} d^{-2(i-l)}$	$\frac{B_{dmnl}}{B_{djk}} \cdot b^{-(k-n)} d^{-2(i-l)}$
z_{jki} / z_{mnl}	$d^{-2(i-l)}$	$d^{-2(i-l)}$
N_{jki} / N_{mnl}	$\frac{B_{dmnl}}{B_{djk}} a^{-2(j-m)} b^{-(k-n)}$	$\frac{B_{dmnl}}{B_{djk}} b^{-(k-n)}$
Геометрические размеры статора		
D_{jk} / D_{mn}	$a^{(j-m)}$	const
L_{jkl} / L_{mnl}	$a^{(j-m)} b^{(k-n)}$	$b^{(k-n)}$
b_{pjki} / b_{pmnl}	$\frac{j_{amnl} B_{dmnl}}{j_{ajki} B_{djk}} a^{(j-m)} d^{2(i-l)}$	$\frac{j_{amnl} B_{dmnl}}{j_{ajki} B_{djk}} \cdot d^{2(i-l)}$
h_{pjki} / h_{pmnl}	$a^{(j-m)}$	const
b_{zjki} / b_{zmnl}	$\frac{B_{djk}}{B_{dmnl}} \frac{B_{zmnl}}{B_{zjki}} a^{(j-m)} d^{2(i-l)}$	$\frac{B_{djk}}{B_{dmnl}} \frac{B_{zmnl}}{B_{zjki}} d^{2(i-l)}$
t_{zjki} / t_{zmnl}	$a^{(j-m)} d^{2(i-l)}$	$d^{2(i-l)}$
Геометрические размеры магнитов		
L_{mjki} / L_{mnn}	$a^{(j-m)} b^{(k-n)}$	$b^{(k-n)}$
h_{mjki} / h_{mnn}	$a^{(j-m)}$	const
b_{mjki} / b_{mnn}	$a^{(j-m)} d^{-2(i-l)}$	$d^{-2(i-l)}$

Закономерности размерного ряда ветрогенераторов определяются как самой постановкой задачи

— желанием получить на одном диаметре девять значений мощности при трех значениях частоты вращения, так и использованием концентрической обмотки статора, что определяет закономерность изменения числа зубцов статора, идентичной изменению числа пар полюсов.

Закономерности изменения основных номинальных данных и геометрических размеров для размерного ряда ветрогенераторов показаны на рис. 1 в относительных единицах, а в табл. 2 приведены их численные значения, за базовую машину принят ветрогенератор 3,5 кВт, 400 В, 75 мин⁻¹.

Таблица 2

k	i	$P, \text{кВт}$	$I, \text{А}$	$n, \text{мин}^{-1}$	$L, \text{мм}$
1	1	3,5	5,6	75	56,0
1	2	7,0	11,2	150	56,0
1	3	14,0	22,4	300	56,0
2	1	4,9	7,9	75	79,2
2	2	9,9	15,8	150	79,2
2	3	19,8	31,7	300	79,2
3	1	7,0	11,2	75	112,0
3	2	14,0	22,4	150	112,0
3	3	28,0	44,8	300	112,0

Полученные в табл. 1 выражения для изменения электромагнитных величин и обмоточных данных связаны с характером изменения индукции в воздушном зазоре, в зубцах статора и плотности тока. Дальнейший анализ выполнен для случая, когда плотность тока, индукция в воздушном зазоре и в зубцах остаются постоянными:

$$B_d = \text{const}; \frac{B_{zjk}}{B_{zmn}} = \text{const}; j_a = \text{const}. \quad (8)$$

Для этого случая на рис. 2—4 показаны закономерности изменения электромагнитных нагрузок и

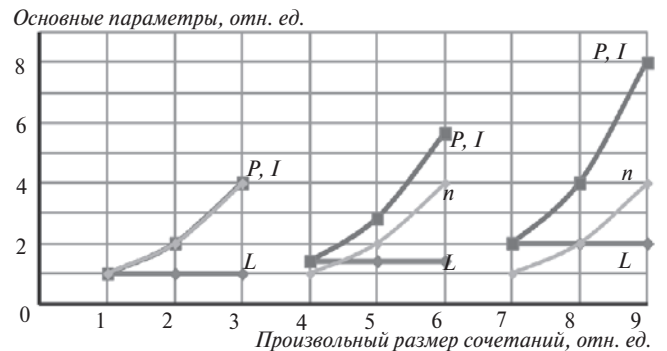


Рис. 1. Закономерности изменения основных номинальных данных и геометрических размеров ветрогенераторов для децентрализованной энергетики

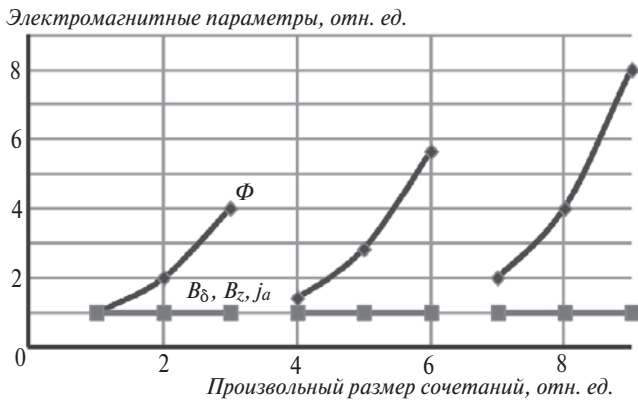


Рис. 2. Закономерности изменения электромагнитных параметров размерного ряда ветрогенераторов

обмоточных данных (табл. 3), а также геометрических размеров (табл. 4) для синхронных ветрогенераторов с постоянными магнитами.

Для автономной интегрированной ветроэнергостановки [5] в Институте химии силикатов РАН был разработан, изготовлен и испытан синхронный генератор с постоянными магнитами (10 кВт, 380 В, 150 мин⁻¹). Генератор выполнен многополюсным, с применением тангенциального расположения по-

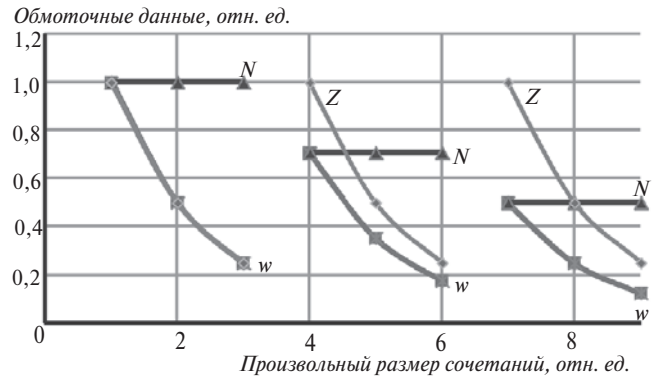


Рис. 3. Закономерности изменения обмоточных данных размерного ряда ветрогенераторов

стоянных магнитов и концентрической обмотки статора и предназначен для работы в комплекте с ветровой турбиной вертикальной компоновки. На рис. 5 показаны общий вид генератора и конструкция статора и ротора. Сравнение геометрии, обмоточных данных и электромагнитных нагрузок опытного образца ветрогенератора с данными закономерностей размерного ряда, приведенное в табл. 5, подтверждает правомерность полученных результатов.

Таблица 3

k	i	Φ , мВб	A , А/см	B_d , Тл	J , А/мм ²	B_z , Тл	w	N	Z
1	1	0,970	218,0	0,9	2,8	1,7	1080	160	81
1	2	1,940	218,0	0,9	2,8	1,7	540	160	41
1	3	3,880	218,0	0,9	2,8	1,7	270	160	20
2	1	1,372	218,0	0,9	2,8	1,7	764	113	81
2	2	2,744	218,0	0,9	2,8	1,7	382	113	41
2	3	5,487	218,0	0,9	2,8	1,7	191	113	20
3	1	1,940	218,000	0,9	2,800	1,7	540	80	81
3	2	3,880	218,000	0,9	2,800	1,7	270	80	41
3	3	7,760	218,000	0,9	2,800	1,7	135	80	20

Таблица 4

k	i	b_p , мм	h_p , мм	t_z , мм	b_z , мм	h_m , мм	b_m , мм
1	1	9,0	29	21,3	12,3	6	7,5
1	2	18,0	29	42,6	24,6	6	15
1	3	36,0	29	85,2	49,2	6	30
2	1	9,0	29	21,3	12,3	6	7,5
2	2	18,0	29	42,6	24,6	6	15
2	3	36,0	29	85,2	49,2	6	30
3	1	9,0	29	21,3	12,3	6	7,5
3	2	18,0	29	42,6	24,6	6	15
3	3	36,0	29	85,2	49,2	6	30

Геометрические размеры, отн. ед.

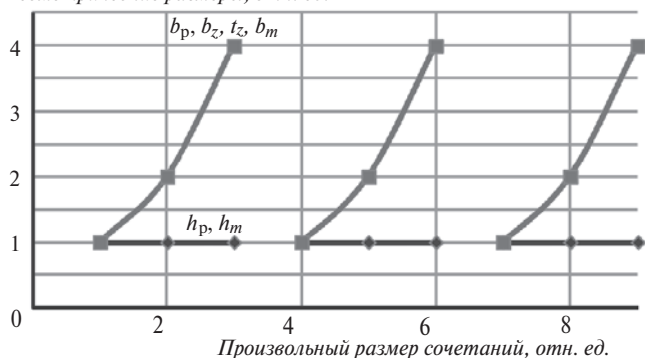


Рис. 4. Закономерности изменения геометрических размеров размерного ряда ветрогенераторов

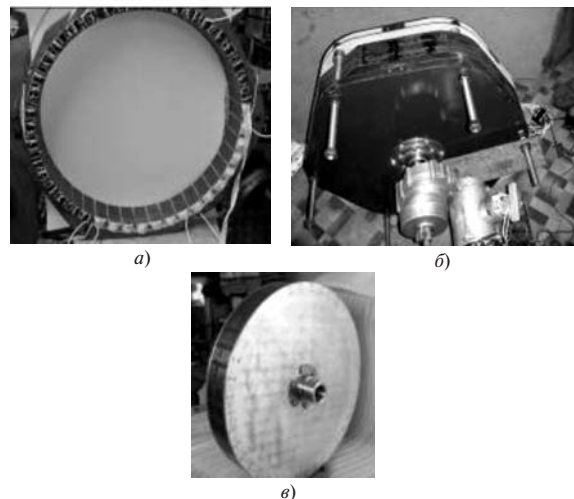


Рис. 5. Опытный образец ветрогенератора: а — статор с концентрической обмоткой; б — ротор с тангенциально намагниченными высококоэрцитивными магнитами; в — генератор на испытательном стенде

Таблица 5

Данные	Закономерности размерного ряда	Опытный образец
P , кВт	9,9	10,0
U , В	400	380
I , А	15,8	16,9
n , мин ⁻¹	150	150
D_a , мм	550	550
Φ , мЛвб	2,74	3,25
A , А/см	218	197
W	382	336
Z	42	42
N	113	96
B_d , Тл	0,9	1,02
B_z , Тл	1,41	1,67
j_a , А/мм ²	2,8	2,27
t_z , мм	42,6	41,1
b_z , мм	17,4	15,1
b_p , мм	18,0	26,4
h_p , мм	29,0	29,0
l_m , мм	89,2	84
b_m , мм	15	30
h_m , мм	6	10

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гури́н Я.С., Кузнецов Б.И. Проектирование серий асинхронных двигателей. — М.: Энергия, 1978, 479 с.
2. Antipov V.N., Kruchinina I.Yu., Grozov A.D., Ivanova A.V. Size Spectrum Investigation of Mini Turbogenerators for Gas Turbine Unitsю. — Proc. of the XX International Conf. on Electrical Machines. — Marseille (France), 2012, CD-ROM, PID2412641.
3. Антипов В.Н., Кручинина И.Ю., Грозов А.Д. и др. Исследование закономерностей изменения параметров размерного ряда мини-турбогенераторов для малоразмерных газотурбинных установок. — Электричество, 2013, № 12, с. 51–56.
4. Данилевич Я.Б., Антипов В.Н. Анализ и исследование со-размерного ряда синхронных машин как ветрогенераторов в диапазоне частот вращения 75–300 мин⁻¹. — Электротехника, 2009, № 1, с. 27–33.
5. Данилевич Я.Б., Антипов В.Н., Кручинина И.Ю. и др. Автономная интегрированная ветроэнергоустановка с использованием наноструктурированных материалов для хранения и преобразования электрической энергии. — Альтернативная энергетика и экология, 2009, № 4, с. 81–90.

[22.11.13]

Автор: Антипов Виктор Николаевич окончил электромеханический факультет Ленинградского политехнического института 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.

Specific Features of the Regularities in Constructing the Size Series of Wind Generators for Decentralized Power Facilities

V. N. ANTIPOV

Regularities pertinent to the size series of permanent-magnet synchronous machines used as wind generators in decentralized power engineering applications are investigated. Various correlations

between the electromagnetic loads, geometrical sizes, and the parameters of stator winding and permanent magnets are considered, and a comparison with real designs is carried out. By using the regularities pertinent to setting up the size series of wind generators determined in the article it is possible to obtain nine values of power output for one size of stator diameter at three values of rotation frequency.

Key words: wind generators, synchronous machines, permanent magnets, size series, optimization

Author: Viktor Nikolaevich Antipov graduated from the Electromechanical Department of the Leningrad Polytechnic Institute in 1963. In 1989 he received the degree of Doct. Techn. Sci. His thesis dealt with provisions aimed at ensuring the preset switching qualities in designing industrial-purpose DC machines. He is a leading researcher in the laboratory for chemical power engineering and environmental problems at the Grebenshchikov Institute for the Chemistry of Silicates of the Russian Academy of Sciences.