

УДК 621.548

Ю.Н.Перминов,<sup>1</sup> канд.техн.наук, В.П.Коханевич,<sup>2</sup> канд.техн.наук, Т.В.Зинченко<sup>3</sup> (Институт возобновляемой энергетики НАН Украины, Киев)

### Алгоритм расчета синхронных генераторов торцевой конструкции с двумя магнитными системами, расположенными по торцам статора, для ветроэнергетических установок

Разработан алгоритм расчета синхронного генератора торцевой конструкции с двумя магнитными системами на базе постоянных магнитов, расположенных по торцам статора, и проведена его апробация на генераторе мощностью 200 Вт. Библ. 4, табл. 1, рис. 2.

**Ключевые слова:** ветроэнергетика, синхронный генератор, возбуждение от постоянных магнитов.

ORCID: <sup>1</sup>0000-0001-5604-8327; <sup>2</sup>0000-0003-0033-1355; <sup>3</sup>0000-0002-6598-6347.

Широкое распространение синхронных генераторов с возбуждением от постоянных магнитов в современных ветроэлектрических установках малой мощности требует разработки и усовершенствования методик их расчета. Учитывая разнообразие конструкций данного типа генераторов, их невозможно охватить одной методикой. В то же время для ряда типовых конструкций синхронных генераторов с возбуждением от постоянных магнитов разработаны алгоритмы их расчета с учетом накопленных теоретических исследований и практических наработок, которые отражены в работах [1, 2].

В данной статье предложен алгоритм расчета генератора торцевой конструкции (рис. 1) с двумя магнитными системами на базе постоянных магнитов, расположенных по торцам статора, и проведена его апробация на генераторе мощностью 200 Вт. Алгоритм расчета состоит из следующих этапов:

этап 1 – выбор номинальных параметров генератора;

этап 2 – расчет параметров генератора;

этап 3 – расчет магнитной системы;

этап 4 – расчет параметров статора;

этап 5 – уточнение электрических параметров генератора;

этап 6 – расчет генератора мощностью 200 Вт и его экспериментальная проверка.

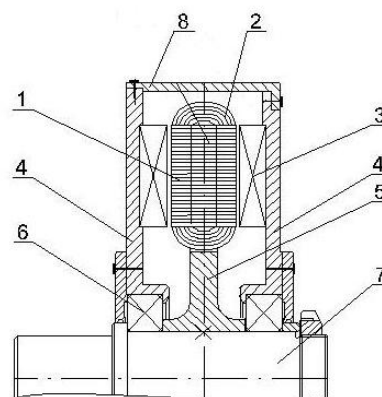


Рис. 1. Общий вид генератора торцевой конструкции с беспазовым статором:

1 – пакет статора; 2 – обмотка; 3 – магниты; 4 – подшипниковые щиты; 5 – ярмо статора; 6 – подшипники; 7 – вал; 8 – корпус ротора.

#### Этап 1. Выбор номинальных параметров генератора.

Исходными номинальными параметрами, как правило, являются:

- номинальная мощность генератора  $P$ ;
- фазное напряжение  $U_{\phi}$ ;
- частота выходного напряжения  $f$ ;
- число фаз  $m$ ;
- номинальная частота вращения  $\omega$ .

Номинальная мощность генератора и номинальная частота вращения определяются при расчете параметров ротора ветроустановки или (при их отсутствии) со следующих выражений [3]:

Мощность на валу ротора ветроустановки:

$$P_p = \frac{1}{2} C_p \cdot \rho \cdot S \cdot V^3, \quad (1)$$

где  $C_p$  – коэффициент использования энергии ветра;  $\rho$  – плотность воздуха;  $S$  – площадь ометаемой поверхности ротора;  $V$  – скорость ветрового потока.

Из (1) получаем площадь ометаемой поверхности ротора:

$$S = \frac{2 \cdot P_p}{C_p \cdot \rho \cdot V^3}, \quad (2)$$

соответственно, радиус ротора будет равен:

$$R = \sqrt{\frac{S}{\pi}}. \quad (3)$$

Имея радиус ротора, находим частоту его вращения:

$$\omega_p = \frac{Z_H \cdot V}{R}, \quad (4)$$

где  $Z_H \cong 6 \div 7$  – коэффициент номинальной быстроходности ротора [3].

Номинальная мощность генератора:

$$P = P_p \cdot \eta, \quad (5)$$

где  $\eta$  – КПД трансмиссии от ротора к генератору.

Номинальная частота вращения генератора:

$$\omega = \omega_p \cdot i_T, \quad (6)$$

где  $i_T$  – передаточное отношение трансмиссии от ротора к генератору.

Фазное напряжение и частота выходного напряжения определяются из требований к системе генерации электрической энергии.

## Этап 2. Расчет основных параметров генератора.

Мощность 3-х фазного генератора равна:

$$P = 3U_\phi \cdot I_\phi \cdot \cos \varphi, \quad (7)$$

где  $I_\phi$  – фазный ток;  $\cos \varphi \cong 0,8 \div 0,85$  – коэффициент мощности.

Фазный ток равен:

$$I_\phi = \frac{P}{3U_\phi \cdot \cos \varphi}. \quad (8)$$

Электромагнитный момент генератора:

$$M_\varepsilon = \frac{P}{\omega}. \quad (9)$$

С другой стороны, электромагнитный момент может быть определен по формуле:

$$M_\varepsilon = \alpha_i \cdot A \cdot B_\delta \cdot \pi \cdot D_C^3 \cdot \lambda, \quad (10)$$

где  $\alpha_i \cong 0,72 \div 0,8$  – коэффициент полюсного перекрытия;  $A \cong (10 \div 12) \cdot 10^3$  А/м – линейная нагрузка;  $B_\delta \cong 0,29 \div 0,31$  Тл – предварительное значение индукции в рабочем зазоре при беспазовой конструкции статора и с применением магнитов NdFeB;  $D_C$  – диаметр статора;  $\lambda \cong 0,5$  – отношение активной длины тороидального сердечника статора к его диаметру.

Выражение (10) позволяет определить диаметр статора:

$$D_C = \sqrt[3]{\frac{M_\varepsilon}{\alpha_i \cdot A \cdot B_\delta \cdot \pi \cdot \lambda}}. \quad (11)$$

Из опыта проектирования аналогичных машин принимаем:

- число полюсов:  $2p = 8$  ( $p$  – число пар полюсов);
- число секций:  $n_C = 24$ ;
- число фаз:  $m = 3$ ;
- число катушек в фазе:  $n_K = 8$ ;
- используемые магниты и их геометрия: предполагается использование магнитов трапециевидальной формы, заполняющих всю площадь торца, из сплава типа NdFeB.

## Этап 3. Расчет магнитной системы.

В соответствии с [4] максимальный магнитный момент обеспечивается при следующих геометрических параметрах генератора (рис. 2):

- внешний радиус магнитного тора:  $R_1 = 0,5D_C$ ;
- внутренний радиус магнитного тора:  $R_2 = 0,5R_1$ .

С учетом технологических рекомендаций по изготовлению аналогичных генераторов можно принять следующее:

- зазор между ротором и обмоткой:  $\delta_3 = 1,5$  мм;
- толщина катушки:  $h_K = 8$  мм;
- высота магнита:  $h_M = 7$  мм.

Площадь сечения полюса равна:

$$S_m = \frac{0,785(D_C^2 - D_{C\delta}^2)}{2p}, \quad (12)$$

где  $D_{C\delta}$  – внутренний диаметр статора.

Внутренний диаметр статора для данного типа генераторов обычно совпадает с внутренним радиусом магнитного тора, т.е.  $D_{C\delta} = 2R_2$ .

Суммарная проводимость рассеяния в соответствии с [4]:

$$\lambda_s = \frac{2}{\pi} R_1 \varphi \mu_0 + \frac{2}{\pi} R_2 \varphi \mu_0 + \frac{4}{\pi} R_1 \mu_\phi - \frac{4}{\pi} R_2 \mu_\phi, \quad (13)$$

где  $\varphi$  – центральный угол полюсной дуги;  $\mu_0$  – магнитная проницаемость воздуха;

$\mu_\phi = \frac{B_r}{H_C}$  – проницаемость магнита (определяется как отношение остаточной индукции  $B_r$  к коэрцитивной силе  $H_C$ ).

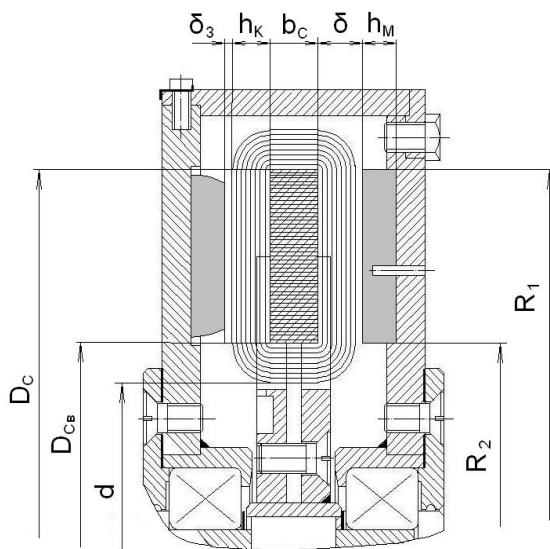


Рис. 2. Основные геометрические параметры генератора.

Полезный поток на один полюс в соответствии с [4] будет составлять:

$$\Phi_\delta = \frac{B_r \cdot S_m \cdot \lambda_\delta}{\lambda_\delta + \lambda_s + \mu_\phi \frac{S_m}{h_M}}, \quad (14)$$

где  $\lambda_\delta$  – проводимость рабочего зазора на один полюс.

Выражение для  $\lambda_\delta$  имеет следующий вид:

$$\lambda_\delta = \frac{\mu_0 \cdot S_\delta}{\delta}, \quad (15)$$

где  $S_\delta$  – площадь рабочего зазора ( $S_\delta = S_m$ );  $\delta = h_K + \delta_3$  – полный немагнитный зазор, включающий толщину катушки и зазор в свету.

Индукция в рабочем зазоре:

$$B_\delta = \frac{\Phi_\delta}{S_\delta}.$$

**Этап 4. Расчет параметров статора.**

Толщина тороидального сердечника равна:

$$b_C = \frac{\Phi_\delta}{B_\delta (R_1 - R_2)}, \quad (16)$$

где  $B_\delta \cong 1,4$  Тл – допустимая индукция в сердечнике.

Минимальный диаметр по размещению катушек:

$$d = D_{C\delta} - 2h_K. \quad (17)$$

Ширина катушки:

$$b_K = \frac{0,9 \cdot \pi \cdot d}{n_C}. \quad (18)$$

Длина среднего витка катушки:

$$l_{Kcp} = (D_C - D_{C\delta} + 2h_K) + 2(b_C + h_K). \quad (19)$$

Число витков в катушке:

$$W_K = \frac{0,84 b_K \cdot h_K}{d_{np}^2}, \quad (20)$$

где  $d_{np}$  – диаметр провода (без изоляции).

Диаметр провода определяется исходя из допустимой плотности тока в обмотке  $j$ . Из опыта проектирования аналогичных генераторов плотность тока в обмотке принимаем равной:  $j = 5,5$  А/мм<sup>2</sup>.

Активное сопротивление катушки:

$$R_K = \frac{\rho \cdot l_{Kcp} \cdot W_K}{q}, \quad (21)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление материала провода;  $q$  – площадь поперечного сечения провода.

**Этап 5. Уточнение электрических параметров генератора.**

Сопротивление фазы равно:

$$R_\phi = n_K \cdot R_K = 8R_K. \quad (22)$$

Количество витков фазы:

$$W_{\phi} = n_K \cdot W_K = 8W_K. \quad (23)$$

Частота ЭДС:

$$f = \frac{p \cdot \omega}{2\pi}. \quad (24)$$

ЭДС фазы:

$$E_{\phi} = 4,44 f \cdot \Phi_{\delta} \cdot W_{\phi} \cdot k_O, \quad (25)$$

где  $k_O$  – коэффициент обмотки.

Индуктивное сопротивление фазы:

$$X_{\phi} = \frac{k_d \cdot 2m \cdot f \cdot \mu_0 \cdot D_C \cdot l_a \cdot W_{cp}^2 \cdot 0,5}{k_{\delta} \cdot k_{\mu} \cdot \delta \cdot p^2}, \quad (26)$$

где  $k_d \cong 0,6$  – коэффициент, учитывающий реакцию якоря;  $k_{\mu} = 1,1$  – коэффициент, учитывающий насыщение магнитной цепи;

$l_a = \left( \frac{D_C - D_{C\epsilon}}{2} \right)$  – активная длина проводника.

Падение напряжения на активном сопротивлении равно:

$$U_{R-\phi} = I_{\phi} \cdot R_{\phi}. \quad (27)$$

Падение напряжения на индуктивном сопротивлении:

$$U_{X-\phi} = I_{\phi} \cdot X_{\phi}. \quad (28)$$

Фазное напряжение генератора:

$$U_{\phi} = U_{R-\phi} \pm \sqrt{E_{\phi}^2 - U_{X-\phi}^2}. \quad (29)$$

Электромагнитная мощность:

$$P_{\Sigma} = m \cdot U_{\phi} \cdot I_{\phi} \cdot \cos \varphi. \quad (30)$$

Линейная нагрузка:

$$A = \frac{I_{\phi} \cdot N}{\pi \cdot D_{cp}}, \quad (31)$$

где  $N = 3W_{\phi}$  – полное число проводников обмотки;  $D_{cp} = \frac{D_C + D_{C\epsilon}}{2}$  – средний диаметр тора.

Удельный тепловой поток:

$$A \cdot j \leq 10 \cdot 10^{10}.$$

**Этап 6. Расчет генератора мощностью 200 Вт и его экспериментальная проверка.**

В таблице 1 приведен пример расчета генератора мощностью 200 Вт при скорости вращения 300 об/мин по указанному алгоритму.

Таблица 1

Параметры	Единица измерения	Расчетные значения	Экспериментальные значения
Диаметр голого провода	мм	0,62	
Диаметр изолированного провода	мм	0,69	
Сечение провода	мм <sup>2</sup>	0,3	
Число витков в секции	шт.	118	
Число витков в фазе	шт.	947	
Сопротивление секции (активное)	Ом	0,93	
Сопротивление фазы	Ом	7,48	
Плотность тока в фазе	А/мм <sup>2</sup>	5,5	
Фазный ток	А	1,65	1,73
Магнитный поток на пару полюсов ( $\times 10^3$ )	Вб	0,55	
Индукция в рабочем зазоре	Тл	0,3	
Фазная ЭДС	В	45,5	
Индуктивное сопротивление фазы	Ом	1,2	
Падение напряжения на активном сопротивлении	В	12,3	
Падение напряжения на индуктивном сопротивлении	В	2	
Фазное напряжение	В	33,2	35,6
Электромагнитная мощность	Вт	200	185
Линейная нагрузка ( $\times 10^3$ )	А/м	11	
Удельный тепловой поток ( $\times 10^{10}$ )	А <sup>2</sup> /м <sup>3</sup>	6	
Масса машины	кг	8	

**Выводы.** 1. Принятые в начале расчета удельные электромагнитные нагрузки  $A$  и  $B_{\delta}$  соответствуют значениям, полученным в результате расчета.

2. Отклонение экспериментальных данных от результатов расчета по разработанному алгоритму не превышает 7,5%.

1. Кудря С.А., Перминов Ю.Н., Буденный И.В. Некоторые особенности проектирования синхронных ветрогенераторов повышенной мощности с возбуждением от постоянных магнитов // Відновлювана енергетика. – 2014. – № 3. – С. 54–57.

2. Перминов Ю.Н., Коханевич В.П., Буденный И.В., Долец А.М. Алгоритм расчета синхронных генераторов с возбуждением от постоянных магнитов для ветроэнергетических установок // Відновлювана енергетика. – 2015. – № 2. – С. 60–65.

3. Фатеев Е.М. Ветро двигатели. – Л.: ВИМЭ, 1946. – 244 с.

4. Перминов Ю.Н. Проектирование электродвигателей с кольцевыми многополюсными анизотропными магнитами // Известия высших учебных заведений: Электромеханика. – 1988. – № 11. – С. 45–50.

#### REFERENCES

1. Kudrya S.A., Perminov Yu.N., Budenny I.V. Some design features of synchronous high-power wind turbines with permanent-magnet excitation // Vidnovliuvana enerhetyka. – 2014. – № 3. – Pp. 54–57.

2. Perminov Yu.N., Kokhanevich V.P., Budenny I.V., Dolnets A.M. Algorithm for calculating synchronous generators for wind turbines with permanent magnets excitation // Vidnovliuvana enerhetyka. – 2015. – № 2. – Pp. 60–65.

3. Fateev Ye.M. Wind turbines. – L.: VIME, 1946. – 244 p.

4. Perminov Yu.N. Designing electric motors with annular multipolar anisotropic magnets // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy: Elektromekhanika. – 1988. – № 11. – Pp. 45–50.

**Ю.М.Пермінов**, канд.техн.наук, **В.П.Коханевич**, канд.техн.наук, **Т.В.Зінченко** (Інститут відновлюваної енергетики НАН України, Київ)

**Алгоритм розрахунку синхронних генераторів торцевої конструкції з двома магнітними системами, розташованими на торцях статора, для вітроенергетичних установок**

*Розроблено алгоритм розрахунку синхронного генератора торцевої конструкції з двома магнітними системами на базі постійних магнітів, розташованих по торцях статора, та проведено його апробацію на генераторі потужністю 200 Вт. Бібл. 4, табл. 1, рис. 2.*

**Ключові слова:** вітроенергетика, синхронний генератор, збудження від постійних магнітів.

**Perminov Yu.N., Kokhanevich V.P., Zinchenko T.V.**, (Institute of Renewable Energy, NAS of Ukraine, Kyiv)

**Algorithm for calculating synchronous end design generators with located at stator ends two magnetic systems for wind turbines**

*There has been developed an algorithm for calculating a synchronous end design generator with two magnetic systems based on permanent magnets and arranged at stator ends; the algorithm got tested on 200 Watt generator. References 4, table 1, figures 2.*

**Keywords:** wind power, synchronous generator, permanent magnet excitation.

#### SYNOPSIS

Widespread use of synchronous generators with permanent magnet excitation in modern wind power plants requires development and upgrade of their calculation methods. Considering the variety of this generator type structures this is hard to make with one procedure. At the same time for a number of standard designs with synchronous generators excited by permanent magnets there have been developed calculation algorithms that take into account the accumulated theoretical research and practical achievements.

The paper suggests the calculating algorithm for end design generators with two magnetic systems based on permanent magnets being installed on stator ends; the algorithm got tested on 200 Watt generator.

The calculation algorithm includes the following steps:

- step 1 – choice of nominal generator parameters;
- step 2 – calculation of generator parameters;
- step 3 – calculation of magnetic system;
- step 4 – calculation of stator parameters;
- step 5 – clarifying generator electric parameters;
- step 6 – calculation for a 200 Watt generator and its experimental verification.

The deviation between experimental data and the developed algorithm for a 200 Watt generator does not exceed 7.5%.

Стаття надійшла до редакції 27.05.16

Остаточна версія 07.06.16