

Для системи орієнтації з відхиленням ротора від напрямку повітряного потоку енергетичні втрати визначаються її статичною характеристикою.

1. Фатеев Е.М. Ветро двигатели. – Л.: ВИМЭ, 1946. – 244 с.
2. Коханевич В.П., Душина Г.П., Романченко Д.С., Терентьев О.М. Влияние номинальной скорости ветра на экономические и технические характеристики ветровых электрических установок при эксплуатации в ветровых условиях Украины // Відроджена енергетика. – 2010. – №4. – С. 48–53.

УДК 621.548

Ю.Н.Перминов, канд.техн.наук, В.П.Коханевич, канд.техн.наук, И.В.Буденный, А.М.Донец (Институт возобновляемой энергетики НАН Украины, Киев)

### Алгоритм расчета синхронных генераторов с возбуждением от постоянных магнитов для ветроэнергетических установок

*Разработан алгоритм расчета синхронного генератора цилиндрической конструкции с радиальной магнитной системой на базе постоянных магнитов и проведена его апробация на генераторе мощностью 200 Вт.*

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

*Розроблено алгоритм розрахунку синхронного генератора циліндричної конструкції з радіальною магнітною системою на основі постійних магнітів та проведено його апробацію на генераторі потужністю 200 Вт.*

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

В современных ветроэлектрических установках малой мощности в системах генерации электрической энергии (СГЭЭ) преимущественно используются синхронные генераторы с возбуждением от постоянных магнитов. Различные конструкции данного типа генераторов обуславливают специфику расчета их элементов. На сегодняшний день с учетом накопленного опыта в проектировании генераторов необходимо обобщение полученных результатов и создание алгоритмов по расчету основных конструкций синхронных генераторов, которые используются в ветроустановках.

В данной статье предлагается алгоритм расчета генератора цилиндрической конструкции с радиальной магнитной системой и обмотками, расположенными в пазах статора (рис. 1), который выполнен из листовой электротехнической стали, и проведена его апробация на генераторе мощностью 200 Вт.

Алгоритм расчета состоит из следующих этапов:

- этап 1 – выбор (расчет) номинальных параметров генератора;

- этап 2 – расчет параметров генератора;
- этап 3 – расчет характеристики намагничивания;
- этап 4 – уточнение электрических параметров генератора;
- этап 5 – расчет генератора мощностью 200 Вт и его экспериментальная проверка.

#### Этап 1. Выбор (расчет) номинальных параметров генератора.

Исходными номинальными параметрами, как правило, являются:

- номинальная мощность генератора –  $P$ ;
- фазное напряжение –  $U_{\phi}$ ;
- частота выходного напряжения –  $f$ ;
- число фаз –  $m$  (обычно  $m=3$ );
- номинальная частота вращения –  $\omega$ .

Номинальная мощность генератора и номинальная частота вращения определяются при расчете параметров ротора ветроустановки, или при их отсутствии со следующих выражений [1].

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.

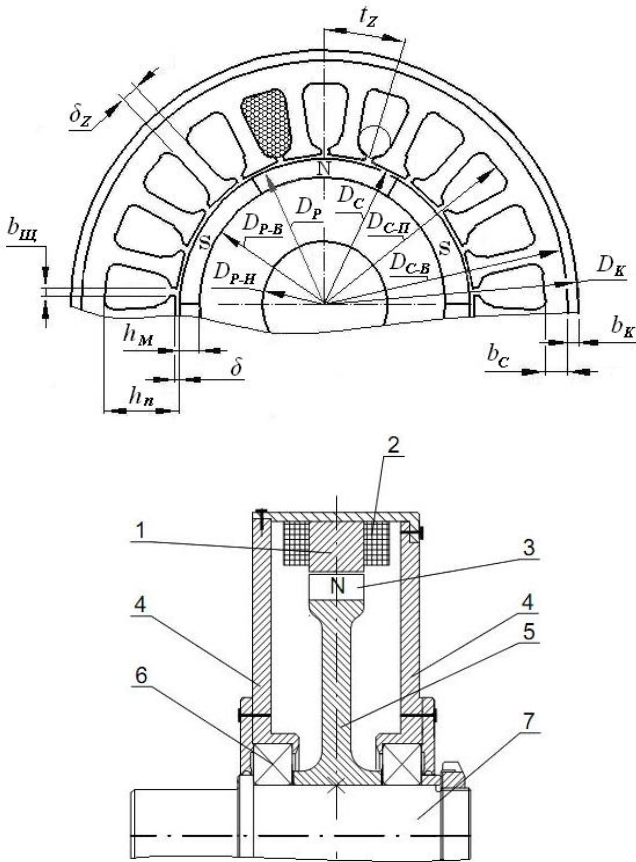


Рис. 1. Общий вид генератора и сечение статора:

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

Из (1) получим площадь ометаемой поверхности ротора:

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

соответственно, радиус ротора будет равен:

$$R = \sqrt{\frac{S}{\pi}}. \tag{3}$$

Имея радиус ротора, находим частоту его вращения:

$$\omega_p = \frac{Z_H \cdot V}{R}, \tag{4}$$

где  $Z_H \cong 6 \div 7$  – коэффициент номинальной быстротходности ротора [1].

Номинальная мощность генератора равна:

$$P = P_p \cdot \eta, \tag{5}$$

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

Номинальная частота вращения генератора:

$$\omega = \omega_p \cdot i_T, \tag{6}$$

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

Фазное напряжение и частота выходного напряжения определяются из требований к СГЭЭ.

**Этап 2. Расчет основных параметров генератора.**

Мощность 3-х фазного генератора равна:

$$P = 3 \cdot U_\phi \cdot I_\phi \cdot \cos \varphi, \tag{7}$$

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

Фазный ток равен:

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

Электромагнитный момент генератора:

$$M_\phi = \frac{P}{\omega}. \tag{9}$$

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

$$M_\phi = \alpha_i \cdot A \cdot B_\delta \cdot \pi \cdot D_p^2 \cdot l_p$$

или

$$M_\phi = \alpha_i \cdot A \cdot B_\delta \cdot \pi \cdot D_p^3 \cdot \lambda, \tag{10}$$

где  $\alpha_i \cong 0,72 \div 0,8$  – коэффициент полюсного перекрытия;  $A \cong (10 \div 12) \cdot 10^3$  А/м – линейная нагрузка;  $B_\delta \cong 0,72 \div 0,8$  Тл – предварительное значение индукции в рабочем зазоре;

$\lambda = \frac{l_p}{D_p} \cong (0,3 \div 0,5)$  – отношение активной

длины ротора  $l_p$  к его диаметру  $D_p$ .

Так как в данной конструкции генератора длина ротора и длина пакета статора  $l_c$  совпадают, а диаметр статора  $D_c$  и диаметр ротора

отличаются незначительно, то  $\lambda = \frac{l_c}{D_c}$  также

является отношением длины пакета статора к его диаметру.

Из выражения (10) следует, что

$$D_p = \sqrt[3]{\frac{M_\phi}{\alpha_i \cdot A \cdot B_\delta \cdot \pi \cdot \lambda}}. \tag{11}$$

Число пар полюсов равно:

$$p = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{\omega} \quad (12)$$

Полное число пазов:

$$Z = 2 \cdot p \cdot m \cdot q, \quad (13)$$

где  $q=1$  – число пазов на полюс и фазу.

Площадь рабочего зазора равна:

$$S_{\delta} = \frac{\pi \cdot D_p^2 \cdot \alpha_i \cdot \lambda}{2 \cdot p} \quad (14)$$

Предварительное значение ЭДС при заданном фазном напряжении:

$$E_{\phi} = (1,15 \div 1,18) \cdot U_{\phi} \quad (15)$$

Полезный поток в рабочем зазоре равен:

$$\Phi_{\delta} = B_{\delta} \cdot S_{\delta} = (0,75 \div 0,8) \cdot S_{\delta} \quad (16)$$

Число витков в фазе:

$$W_{\phi} = \frac{E_{\phi}}{4,44 \cdot f \cdot \Phi_{\delta} \cdot k_o} \quad (17)$$

где  $k_o \cong 0,98$  – коэффициент обмотки.

Число секций в фазе при двухслойной обмотке:

$$n_c = \frac{Z}{m} \quad (18)$$

Число витков в секции равно:

$$W_c = \frac{W_{\phi}}{n_c} \quad (19)$$

Число проводов в пазу:

$$N_{пз} = 2 \cdot W_c \quad (20)$$

Плотность тока в обмотке (ориентировочно) равна:

$$j = 5,5 \div 6 \text{ А/мм}^2 \quad (21)$$

Площадь сечения одного провода:

$$S_{пр} = \frac{I_{\phi}}{j} \quad (22)$$

Диаметр провода:

$$d_{пр} = \sqrt{\frac{S_{пр}}{0,785}} \quad (23)$$

Суммарная площадь сечения проводов в пазу:

$$S_{\Sigma пр} = N_{пз} \cdot q \quad (24)$$

Необходимая площадь сечения паза:

$$S_{пз} = \frac{S_{\Sigma пр}}{k_3} \quad (25)$$

где  $k_3 \cong 0,3 \div 0,35$  – коэффициент заполнения паза.

Зубцовый шаг равен:

$$t_z = \frac{\pi \cdot D_c}{z} \quad (26)$$

где  $D_c = D_p + 2 \cdot \delta_3$  – диаметр статора;  $\delta_3$  – зазор между ротором и статором.

Ширина щели между зубцами:

$$b_{щ} = (1,5 \div 2) \cdot d_{пр} \quad (27)$$

Ширина зубца в зоне рабочего зазора:

$$b_z = t_z - b_{щ} \quad (28)$$

Толщина стенки между пазами статора:

$$\delta_z = \frac{\Phi_{\delta}}{B_{дон} \cdot l_c} \quad (29)$$

где  $B_{дон} \cong (1,4 \div 1,6)$  Тл – допустимая по насыщению индукция в спинке статора;  $l_c = \lambda \cdot D_c$  – активная длина статора.

По рассчитанным параметрам за выражениями (25)–(29) определяется геометрия паза и его высота  $h_n$ .

Толщина спинки статора:

$$b_c = \frac{\Phi_{\delta}}{2 \cdot B_{дон} \cdot l_c} \quad (30)$$

Диаметр статора по основанию пазов равен:

$$D_{c-п} = D_c + 2 \cdot h_n \quad (31)$$

Внешний диаметр пакета статора:

$$D_{c-B} = D_c + 2 \cdot h_n + 2 \cdot b_c \quad (32)$$

Внешний диаметр ярма ротора:

$$D_{p-B} = D_p - 2 \cdot h_M \quad (33)$$

где  $h_M$  – толщина магнита.

Внутренний диаметр ярма ротора:

$$D_{p-H} = D_{p-B} - \frac{\Phi_{\delta}}{B_{дон} \cdot l_p} \quad (34)$$

Диаметр корпуса равен:

$$D_K = D_{c-B} + 2 \cdot b_K \quad (35)$$

На рис. 1 показан пример конструкции генератора и геометрии паза.

**Этап 3. Расчет характеристики намагничивания.**

3.1. Размеры участков магнитной цепи.

Размеры  $D_{P-B}$ ,  $D_{P-H}$ ,  $D_{C-II}$ ,  $D_{C-B}$ ,  $b_C$ ,  $b_Z$ ,  $S_\delta$ ,  $h_n$  принимаем из расчетов предыдущего этапа и с учетом конструкторско-технологической проработки генератора. Рабочий зазор для генераторов мощностью 0,2÷3 кВт равен  $\delta_3 = 0,5$ .

Коэффициент Картера в соответствии с [2] равен:

$$k_\delta = \frac{t_Z + 10 \cdot \delta_3}{b_Z + 10 \cdot \delta_3}.$$

Эквивалентный зазор:

$$\delta = \delta_3 + k_\delta.$$

Сечение спинки статора:

$$S_C = b_a \cdot l_p.$$

Длина средней силовой линии в спинке статора:

$$l_{C-m} = \frac{\pi \cdot D_{C-m}}{2 \cdot p},$$

где  $D_{C-m} = \frac{D_{C-B} + D_{C-II}}{2}$ .

Средний диаметр ярма ротора:

$$D_{P-m} = \frac{D_{P-B} + D_{P-H}}{2}.$$

Длина средней силовой линии поля в роторе равна:

$$l_{P-m} = \frac{D_{P-m}}{2 \cdot p} + \frac{b_{P-m}}{2},$$

где  $b_{P-m} = \frac{D_{P-B} - D_{P-H}}{2}$ .

Площадь сечения ярма:

$$S_я = b_{P-m} \cdot l_p.$$

Площадь сечения зубца:

$$S_Z = b_Z \cdot l_p.$$

3.2. Определение значений магнитного потока  $\Phi_{\delta p}$  и индукции  $B_{\delta p}$  в рабочем зазоре.

Производится по методике [2] при полученных выше геометрических соотношениях магнитной цепи.

3.3. Расчет характеристики намагничивания без учета потоков рассеяния.

Производится также по методике [2].

3.4. Расчет магнитной системы с учетом потоков рассеяния.

Пазовая проводимость рассеяния:

$$\lambda_{II} \cong \frac{\mu_0 \cdot n_\phi \cdot l_M}{n_F},$$

где  $n_\phi$  – число трубок потока;  $n_F$  – число трубок магнитного потенциала;  $l_M$  – активная длина магнита;  $\mu_0$  – магнитная проницаемость воздуха.

Средняя ширина магнита:

$$b_{M-m} = R_{M-m} \cdot \varphi,$$

где  $\varphi$  – центральный угол полюсной дуги;  $R_{M-m}$  – средний радиус магнита, который равен:

$$R_{M-m} = \frac{D_P + D_{P-B}}{2}.$$

Проводимость рассеяния с одного полюса:

$$\lambda_T = \frac{4 \cdot \mu_0 \cdot b_{M-m}}{\pi}.$$

Суммарная проводимость рассеяния полюса:

$$\lambda_S = 2 \cdot \lambda_{II} + 2 \cdot \lambda_T.$$

Далее строится вебер-амперная характеристика магнита.

Среднее сечение магнита равно:

$$S_{M-m} = b_{M-m} \cdot l_p.$$

Высота магнита по опыту проектирования машин с зубцовым статором может быть принята  $h_M = 7 \div 10$  мм при применении магнитов NdFeB.

Магнитный поток по остаточной индукции равен:

$$\Phi = B_r \cdot S_{M-m},$$

где  $B_r$  – остаточная индукция магнита.

Намагничивающая сила по коэрцитивной силе магнита:

$$F = H_C \cdot h_M,$$

где  $H_C$  – коэрцитивная сила.

Зная кривую намагничивания генератора и вебер-амперную характеристику магнита с учетом потоков рассеяния, можно определить магнитный поток в рабочем зазоре. На рис. 2 в качестве примера показаны вебер-амперные характеристики генератора мощностью 200 Вт. Полезный поток определяется пересечением вебер-амперной характеристики генератора с учетом потоков рассеяния и характеристики намагничивания генератора.

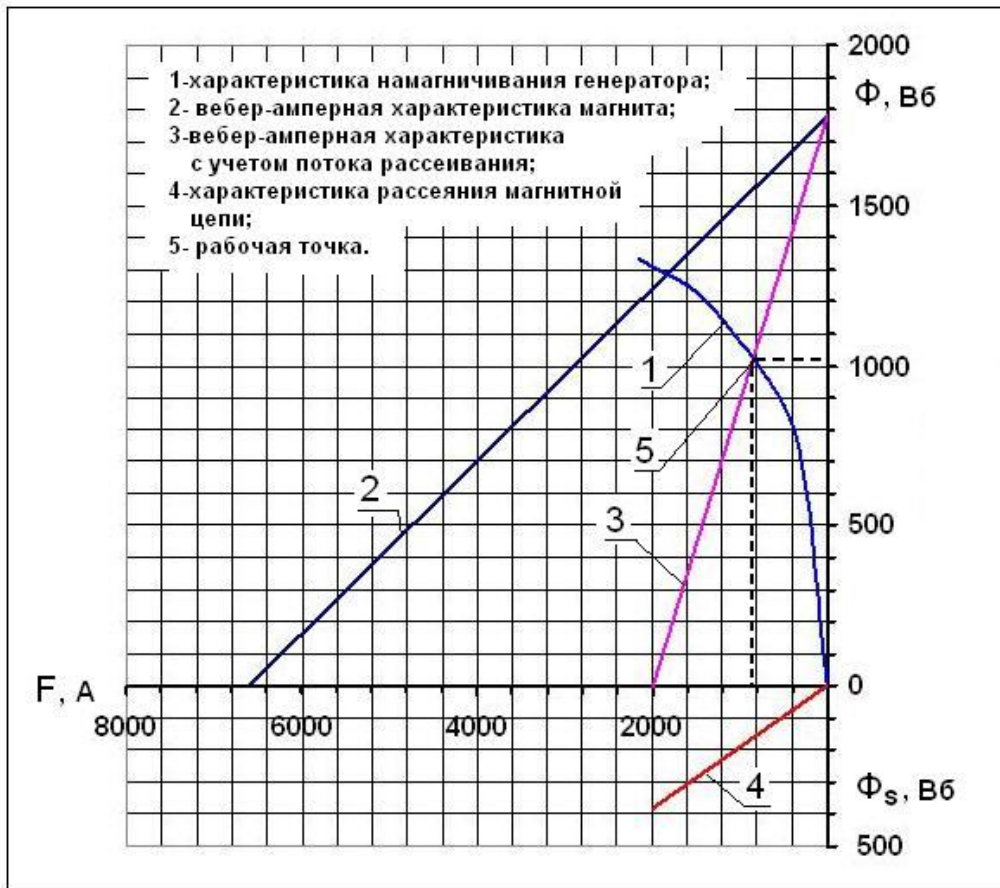


Рис. 2. Вебер-амперные характеристики магнитной системы генератора мощностью 200 Вт.

**Этап 4. Уточнение электрических параметров генератора.**

Уточненное значение ЭДС фазы по рассчитанному значению полезного потока  $\Phi_\delta$  равно:

$$E_\phi = 4,44 \cdot f \cdot \Phi_\delta \cdot W_\phi \cdot k_o.$$

Размер секции обмотки статора показан на рис. 3.

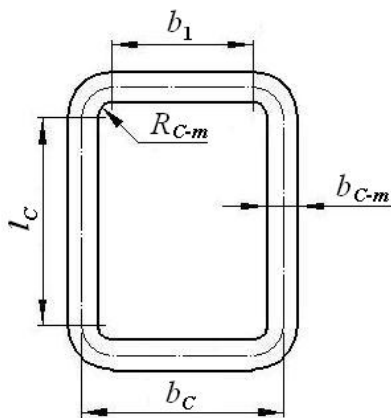


Рис. 3. Размеры секции обмотки статора. Ширина секции обмотки статора:

$$b_c = \frac{\pi \cdot D_c}{2 \cdot p}.$$

Ширина стороны секции  $b_{c-m}$  равна средней ширине паза пакета статора (см. рис. 1).

Длина среднего витка секции равна:

$$l_{B-m} = 2 \cdot l_a + 4 \cdot R_{c-m} \cdot \frac{\pi}{2} + 2 \cdot b_1.$$

Сопротивление секции:

$$R_c = \frac{\rho \cdot l_{B-m} \cdot W_c}{q}.$$

Активное сопротивление фазы:

$$R_{A-\phi} = R_c \cdot n_c.$$

Индуктивное сопротивление фазы:

$$X_\phi = \frac{k_d \cdot 2 \cdot m \cdot f \cdot \mu_0 \cdot l_c \cdot W_\phi^2 \cdot k_o^2 \cdot 0,5}{k_\delta \cdot k_\mu \cdot \delta \cdot p^2},$$

где  $k_d \cong 0,6$  – коэффициент, учитывающий реакцию якоря;  $k_\mu = 1,1 \div 1,2$  – коэффициент, учитывающий насыщение магнитной цепи.

Падение напряжения на активном сопротивлении фазы:

$$U_R = I_\phi \cdot R_{A-\phi}.$$

Падение напряжения на индуктивном сопротивлении фазы:

$$U_{X-\phi} = I_{\phi} \cdot X_{\phi}.$$

Фазное напряжение:

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

Электромагнитная мощность:

$$P_{\phi} = m \cdot U_{\phi} \cdot I_{\phi} \cdot \cos \varphi.$$

### Этап 5. Расчет генератора мощностью 200 Вт и его экспериментальная проверка.

В таблице 1 приведен расчет генератора мощностью 200 Вт по указанному алгоритму.

Таблица 1

Параметры	Единицы измерения	Расчетные значения	Экспериментальные значения
Диаметр голого провода	мм	0,62	
Сечение провода	мм	0,3	
Число витков в фазе	шт.	504	
Сопротивление фазы (активное)	Ом	5,12	
Плотность тока в фазе	А/мм <sup>2</sup>	5,5	
Номинальный фазный ток	А	1,6÷1,85	1,94
Индукция в рабочем зазоре	Тл	0,85	
Фазная ЭДС	В	44	
Индуктивное сопротивление фазы	Ом	2,51	
Номинальное фазное напряжение	В	35,3	36
Электромагнитная мощность	Вт	195	210
Линейная нагрузка	А/м · 10 <sup>3</sup>	14,85	
Удельный тепловой поток	А <sup>2</sup> /м <sup>3</sup>	8,16	
Габариты корпуса (диаметр/длина)	мм	180/81	
Масса магнитов	кг	0,6	
Масса машины	кг	7	

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

2. Отклонение экспериментальных данных от результатов расчета по разработанному алгоритму

не превышают 8%.

1. *Фатеев Е. М.* Ветро двигатели. – Л.: ВИМЭ, 1946. – 244 с.
2. *Костенко М.П., Пиотровский Л.М.* Электрические машины, часть вторая. – Л.: Энергия, 1964. – 247 с.