

УДК 621.548

С.А.Кудря, докт.техн.наук, Ю.Н.Перминов, канд.техн.наук, И.В.Буденный (Институт возобновляемой энергетики НАН Украины, Киев)

## Некоторые особенности проектирования синхронных ветрогенераторов повышенной мощности с возбуждением от постоянных магнитов

*В статье изложен алгоритм расчета синхронных ветрогенераторов повышенной мощности, указаны особенности проектирования.*

**Ключевые слова:** алгоритм расчета синхронных ветрогенераторов повышенной мощности, особенности проектирования.

*У статті викладено алгоритм розрахунку синхронних вітрогенераторів підвищеної потужності, вказані особливості проектування.*

**Ключові слова:** алгоритм розрахунку синхронних вітрогенераторів підвищеної потужності, особливості проектування.

Известно, что в наиболее активных ветрозо-нах Украины скорость ветра составляет 4,5-5 м/с. При этом средняя повышенная скорость ветра составляет примерно 25-30% общего времени и находится в пределах 7-8 м/с. Поэтому проектирование генераторов проводится, ориентируясь на эту скорость ветра. Низкая скорость ветра требует увеличения ометаемой поверхности ветроколеса, т.е. увеличения радиуса колеса.

Мощность, развиваемая ветроколесом:

$$P = \frac{\rho \cdot S \cdot v^3 \cdot k}{2}, \quad (1)$$

где  $\rho \approx 0,35 \div 0,38$  – КПД ветроколеса;  $S$  – площадь ометаемой поверхности,  $m^2$ ;  $v$  – скорость ветра, м/с;  $k = 1,3$  – удельный вес воздуха,  $кг/м^3$ ;  $P$  – мощность, Вт.

Скорость вращения ветроколеса:

$$\omega = \frac{z' \cdot v}{R}, \quad (2)$$

где  $z' = 6 \div 7$  – коэффициент быстроходности (ориентировочно);  $R$  – радиус ветроколеса, м.

Повышение мощности ветроколеса требует увеличения его радиуса, поэтому с повышением мощности ветроколеса его скорость вращения снижается и сопровождается увеличением требуемых габаритов генератора.

Ниже приведен алгоритм расчета ветрогенератора мощностью 600 кВт, позволяющий опре-

делить дополнительные особенности проектирования.

Используя зависимости (1), (2), определяется:

- площадь ометаемой поверхности ветроколеса:

$$S = \frac{2 \cdot P}{\rho \cdot v^3 \cdot k} = \frac{2 \cdot 600.000}{1,3 \cdot 8^3 \cdot 0,38} = 4744 \text{ м}^2; \quad (3)$$

- диаметр ветроколеса и его радиус:

$$D = \sqrt{\frac{S}{0,785}} = \sqrt{\frac{4744}{0,785}} = 78 \text{ м}; \quad R = 39 \text{ м}; \quad (4)$$

- частота вращения ветроколеса:

$$\omega = \frac{z' \cdot v}{R} = \frac{7 \cdot 8}{39} = 1,43 \text{ рад/с (14,0 об/мин)}. \quad (5)$$

Исходные номинальные параметры генератора:

- номинальная мощность  $P = 600\,000$  Вт;
- фазное напряжение  $U_\phi = 690$  В;
- частота выходного напряжения  $f = 50$  Гц;
- частота вращения 14 об/мин;
- КПД  $\geq 80\%$ .

Мощность трехфазного генератора:

$$P = 3 \cdot U_\phi \cdot I_\phi \cdot \cos \varphi, \quad (6)$$

где  $I_\phi = \frac{P}{3 \cdot U_\phi \cdot \cos \varphi} = \frac{600.000}{3 \cdot 690 \cdot 0,87} = 333$  А – фаз-

ный ток;  $U_\phi$  – фазное напряжение;  $\cos \varphi \approx 0,87$ .

Электромагнитный момент генератора:

$$M_{\Sigma} = \alpha_i \cdot A \cdot B_{\sigma} \cdot \pi \cdot D_p^3 \cdot \lambda_p, \quad (7)$$

где  $\alpha_i \approx 0,72$  – коэффициент полюсного перекрытия;  $A \approx 25 \cdot 10^3$  А/м – линейная нагрузка;  $B_{\sigma} \approx 0,72$  Тл – предварительное значение индукции в рабочем зазоре;  $\lambda_p = 0,3$  – отношение длины пакета статора к его диаметру.

Диаметр ротора из (7):

$$D_p = \sqrt[3]{\frac{M_{\Sigma}}{\alpha_i \cdot A \cdot B_{\sigma} \cdot \pi \cdot \lambda_p}} = \sqrt[3]{\frac{419580}{0,72 \cdot 25 \cdot 10^3 \cdot 0,72 \cdot 3,1415 \cdot 0,3}} = 3251 \cdot 10^{-3} \text{ м.} \quad (8)$$

Число пар полюсов:

$$f = \frac{P' \cdot n}{60}; \quad P' = \frac{f \cdot 60}{n} = \frac{50 \cdot 60}{14} = 214. \quad (9)$$

Предварительное значение потока на пару полюсов:

$$\Phi_{\sigma} = B_{\sigma} \cdot S_{\sigma} = 0,72 \cdot 16,7 \cdot 10^{-3} = 12 \cdot 10^{-3} \text{ Вб,} \quad (10)$$

где  $S_{\sigma}$  – площадь рабочего зазора, м<sup>2</sup>:

$$S_{\sigma} = \frac{\pi \cdot D_p}{2 \cdot P'} \cdot \alpha_i \cdot l_p = \frac{3,1415 \cdot 3251 \cdot 10^{-3} \cdot 0,72 \cdot 976 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 214} = 16,7 \text{ м}^2;$$

$$l_p = \lambda \cdot D_p = 0,3 \cdot 3251 \cdot 10^{-3} = 976 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Предварительное значение ЭДС-фазы:

$$E_{\phi} = (1,15 \div 1,18) \cdot U_{\phi} = 1,18 \cdot 690 = 814 \text{ В.} \quad (11)$$

Число витков в фазе:

$$W_{\phi} = \frac{E_{\phi}}{4,44 \cdot f \cdot \Phi_{\sigma} \cdot K_o} = \frac{814}{4,44 \cdot 50 \cdot 12,24 \cdot 10^{-3} \cdot 0,96} = 312. \quad (12)$$

Число пазов в статоре:

$$Z = 2 \cdot P' \cdot m \cdot q = 428 \cdot 3 \cdot 1 = 1284, \quad (13)$$

где  $2 \cdot P' = 2 \cdot 214 = 428$ ;  $m = 3$  – число фаз;  $q = 1$  – число пазов на полюс и фазу.

Выполняем двухслойную обмотку, тогда число секций равно числу пазов, т.к. в одном пазу находятся две стороны секций.

Число секций в обмотке:

$$n_c = Z = 1284. \quad (14)$$

Число секций в фазе:

$$n_{c,\phi} = \frac{n_c}{m} = \frac{1284}{3} = 428. \quad (15)$$

Выполняем всыпную обмотку из трех параллельных ветвей с целью снижения диаметра провода. Тогда в создании ЭДС-фазы участвуют в три раза меньше секций, чем в (15) и число секций в одной параллельной ветви:

$$n_{c,B} = \frac{428}{3} = 142. \quad (16)$$

Однако число витков в секции при трех параллельных ветвях будет больше:

$$W_c = \frac{W_{\phi}}{n_{c,B}} = \frac{312}{142} = 2,19 ;$$

принимая число витков в фазе:

$$W_{\phi} = W_c \cdot n_{c,B} = 2 \cdot 142 = 284 ; \quad (17)$$

сечение провода при плотности тока в обмотке  $j = 7$  А/мм<sup>2</sup>:

$$q = \frac{I_{\phi}}{3 \cdot j} = \frac{333}{3 \cdot 7} = 15,8 \text{ мм}^2. \quad (18)$$

Для выполнения всыпной обмотки с целью снижения диаметра элементарного провода секция мотается в восемь параллельных проводников, тогда сечение элементарного проводника равно:

$$q_{\Sigma} = \frac{q}{8} = \frac{15,8}{8} = 1,97 \text{ мм.} \quad (19)$$

Диаметр элементарного проводника:

$$d_{\Sigma}' = \sqrt{\frac{q_{\Sigma}}{0,785}} = \sqrt{\frac{1,97}{0,785}} = 1,58 \text{ мм.} \quad (20)$$

Таким образом, для выполнения всыпной обмотки ее следует делать из нескольких параллельных ветвей и витков. Это особенность изготовления обмотки машины повышенной мощности с всыпной обмоткой.

Полученный диаметр элементарного проводника приводится к значению, указанному в таблице, и составляет  $d_{\Sigma}' = 1,62 / 1,73$  мм.

Число проводников в пазу:

$$N_{\text{паз}} = 2 \cdot W_c = 2 \cdot 2 = 4. \quad (21)$$

Сечение проводников в пазу:

$$q_{\text{паз}} = N_{\text{паз}} \cdot q = 4 \cdot 15,8 = 63 \text{ мм}^2. \quad (22)$$

Коэффициент заполнения паза:

$$K_3 \approx 0,3. \quad (23)$$

Требуемое сечение паза:

$$S_n = \frac{q_{паз}}{K_3} = \frac{63}{0,3} = 210 \text{ мм}^2. \quad (24)$$

Диаметр статора внутренний:

$$D_{ст.вн} = D_c + 2 \cdot \delta = 3251 + 2 \cdot 4 = 3259 \text{ мм}. \quad (25)$$

Далее определяем размер щели между зубцами  $\delta_{щ}$ , угловой шаг между зубцами геометрический  $\alpha_z$  и электрический:

$$\alpha_{z'} = p' \cdot \alpha_z, \quad (26)$$

где  $p'$  – число пар полюсов.

Это означает, что начала фаз А, В, С – в 1, 3, 5 пазов.

Далее определяется сечение паза  $S_n$ , полное деление  $\tau$ . По полученным размерам определяется геометрия паза, зубцов. В этом случае ширина зубца оказывается малой из-за их большого количества и принятого целого числа пазов на полюс и фазу  $q = 1$ . Это может вызвать насыщение зубца и падение полезного магнитного потока, определяемого при расчете магнитной системы генератора.

Предварительное значение высоты магнита:

$$h_m \approx 10 \text{ мм} \quad (27)$$

и его ширины:

$$b_m = \frac{\pi \cdot (D_p - 2 \cdot h_m)}{2 \cdot p'} = \frac{3,1415 \cdot (3251 - 2 \cdot 10)}{2 \cdot 214} = 23,7 \text{ мм}. \quad (28)$$

Минимальное и максимальное расстояние между магнитами определяется конструктивно. С целью повышения полезного потока магниты могут представлять сегменты, вплотную примыкающие друг к другу. Это позволяет увеличить полезный поток машины. Следует отметить, что в этом случае расчет магнитной системы по

традиционно принятой методике является неприемлемым, т.к. расчет проводимостей путей потоков рассеяния традиционно предполагает отношение объема фигуры, определяющей проводимость, к квадрату расстояния между полюсами. Очевидно, что при сведении этого расстояния к нулю величина проводимости рассеяния и потока рассеяния становятся бесконечно большими и полезный поток становится малым. В действительности магнитная проницаемость магнита NdFeB соизмерима с воздухом, и расчет проводимостей путей потоков рассеяния имеет конечное значение. В этом случае расчет магнитной системы целесообразно проводить в соответствии с рекомендациями, изложенными в [1]. Вся картина поля условно может быть разбита на пазовые проводимости между полюсами  $\lambda_n$  и торцовые проводимости с торцевых поверхностей полюсов  $\lambda_m$ . Проводимостями рассеяния с ребер магнитов можно пренебречь ввиду их малости.

Суммарная проводимость рассеяния на полюсах:

$$\lambda_s = 2 \cdot \lambda_n + 2 \cdot \lambda_m = 2 \cdot (15,6 + 0,378) \cdot 10^{-7} = 3195 \cdot 10^{-7} \text{ Гн}. \quad (29)$$

Проводимость рабочего зазора:

$$\lambda_\delta = \frac{\mu_0 \cdot S_\delta}{\delta} \text{ Гн}, \quad (30)$$

где  $S_\delta = \frac{\pi \cdot D_p \cdot \alpha_i \cdot l_p}{2 \cdot p'} = 18,62 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$  – площадь рабочего зазора полюса.

Тогда

$$\lambda_\delta = \frac{12,55 \cdot 10^{-7} \cdot 18,62 \cdot 10^{-3}}{4,26 \cdot 10^{-3}} = 54,85 \cdot 10^{-7} \text{ Гн}.$$

Далее определяется геометрия участков магнитной цепи и по общепринятой методике [2] строится кривая намагничивания машины и вейбер-амперные характеристики системы (рис. 1).

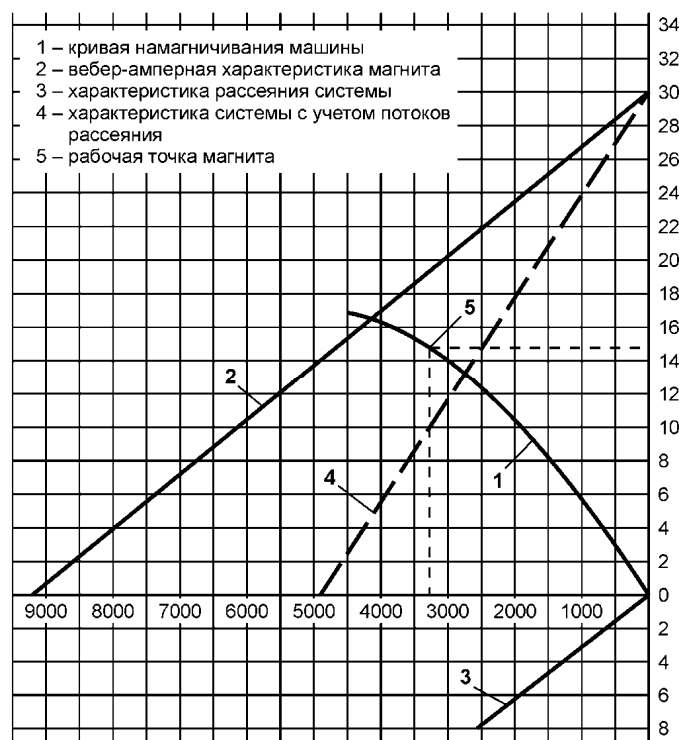


Рис. 1. Вебер-амперные характеристики магнитной системы.

На рис. 1 представлена вебер-амперная характеристика магнита, где  $\Phi_m = B_r \cdot S_m = 29,6 \cdot 10^{-3}$  Вб – произведение остаточной индукции магнита  $B_r$  на площадь полюса в направлении полезного потока (магнит NdFeB);  $F = H_c \cdot h_m = 930 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 9300$  А – МДС магнита;  $H_c$  – коэрцитивная сила;  $\Phi_s = F \cdot \lambda_s = 1000 \cdot 31,95 \cdot 10^{-7} = 3,195 \cdot 10^{-3}$  Вб, где  $F$  – произвольное значение.

Полезный поток определяется точкой пересечения характеристики намагничивания машины – 1 и вебер-амперной характеристикой с учетом рассеяния – 4 (рис. 1). Полученный полезный поток и индукция соответственно равны:

$$\Phi_s = 13,4 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}; B_s = 0,78 \text{ Тл.}$$

Далее рассчитывается геометрия секции, определяются активные и индуктивные сопротивления секции параллельной ветви фазы, строится диаграмма [2] и определяется выходное расчетное фазное напряжение генератора, расчетные значения электромагнитной мощности (6). Расчет потерь в машине, состоящей из потерь в обмотке, потерь в стали ярма и зубцах статора, механиче-

ских потерь, изложен в [3]. По величине подведенной к генератору мощности и суммарным потерям рассчитывается КПД генератора, который в данном случае составляет:

$$\eta = \frac{P}{P_r} = 0,83. \quad (31)$$

**Выводы.** 1. Всыпную обмотку целесообразно выполнять из нескольких параллельных ветвей и проводников с целью снижения диаметра элементарного проводника.

2. При низкой частоте вращения и целом числе пазов на полюс и фазу сечение зубцов может оказаться малым и вызвать насыщение магнитной цепи.

3. Расчет проводимостей путей потоков рассеяния необходимо проводить с учетом магнитной проницаемости магнитов.

1. Мхитарян Н.М., Кудря С.А., Перминов Ю.Н. Определение оптимальной геометрии генератора торцевого исполнения // Відновлювана енергетика. – 2006. – №4. – С. 12.

2. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины, часть вторая. – М-Л-С. – С. 247.

3. Сергеев П.С., Виноградов Н.В. Проектирование электрических машин. – М.: Энергия. – С. 141.