
УДК 621.313.322, 621.313.84

Синхронные генераторы обращенной конструкции с постоянными магнитами для ветроэнергетических установок и малой гидроэнергетики

Иванов Н. С. *, Тулинова Е. Е.

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),

МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия

**e-mail: n.s.ivanov88@gmail.ru*

Аннотация

Представлена аналитическая методика расчета двумерных магнитных полей и выходных параметров синхронных генераторов обращенной конструкции с постоянными магнитами (ПМ) для ветроэнергетических установок и малой гидроэнергетики с учетом геометрии активной зоны, свойств ПМ, числа пар полюсов генератора и пр.

Ключевые слова: двумерные магнитные поля, аналитическая методика, синхронный генератор обращенной конструкции с постоянными магнитами, ветроэнергетика, гидроэнергетика.

Введение

В последние годы большое внимание уделяется увеличению суммарной выработки электроэнергии, вопросам защиты окружающей среды, и одновременному повышению энергоэффективности. Возобновляемые и альтернативные источники энергии (АИЭ) могут быть перспективной заменой традиционным углеводородным топливам. Ветроэнергетика является одним из наиболее важных АИЭ. В настоящее время стоимость выработки 1кВт электроэнергии ветроэнергетическими установками (ВЭУ) постоянно снижается.

Энергия ветра на земном шаре оценивается в $\sim 10^5$ ТВт*час в год. Это примерно в 2,7 раза больше суммарного расхода энергии на планете.

Мощные гидроэлектростанции рассчитаны на большие мощности и, соответственно, на большие водные ресурсы. В то же время, количество географических точек, где возможна

постройка ГЭС, весьма ограничено. Таким образом, применение гидроэлектростанций малой мощности позволит расширить географию использования гидроэнергетики и увеличить суммарную выработку энергии. Промышленно выпускаемые генераторы часто не удовлетворяют специфическим требованиям ветро- и гидроустановок: широкий диапазон изменения скоростей вращения, низкая скорость вращения, многополюсность. В частности, в литературе практически отсутствует информация о низкооборотных генераторах обращенной конструкции, которые в ряде случаев обладают рядом преимуществ при их применении в составе ветро- и гидроустановок малой и средней мощности.

Синхронный генератор обращенной конструкции с ротором на основе постоянных магнитов представляет собой неявнополюсную электрическую машину с индуктором на роторе и якорем на статоре. В данной работе разработана аналитическая методика расчета параметров таких синхронных генераторов, получены соотношения для главного индуктивного сопротивления машины, ЭДС холостого хода, полной энергии магнитного поля, выходной мощности, позволяющие проводить оценку параметров генераторов обращенной конструкции на этапе их проектирования.

Постановка задачи.

Схема многополюсного синхронного генератора (СГ) с постоянными магнитами (ПМ) представлена на рис. 1. Конструктивной особенностью данной машины является обращенная конструкция, при которой индуктор находится на вращающемся корпусе генератора, а якорь неподвижен. При постановке задачи расчета двумерных магнитных полей в дальнейшем принимаются следующие основные допущения:

- вектор намагниченности всех постоянных магнитов \overline{M} имеет только радиальную компоненту $(\overline{M}\{0, M_\rho\})$;
- ярмо статора считается ненасыщенным, $\mu_c \rightarrow \infty$;
- ярмо индуктора считается ненасыщенным, $\mu_u \rightarrow \infty$;
- используется приближение активной зоны обмотки статора эквивалентным токовым слоем, расположенным на радиусе якоря R_S с линейной плотностью J_0 , синусоидально распределенной по угловой координате φ ($J = J_0 \sin(p\varphi)$) (см. рис.2);
- машина считается достаточно длинной, $\tau/L \ll 1$ (здесь τ – полюсное деление, L_S – активная длина СГ).

Задача о распределении стационарных двухмерных магнитных полей в синхронном генераторе обращенной конструкции сводится к решению уравнения Пуассона относительно векторного магнитного потенциала A ($B = \text{rot}(A)$) /1/:

$$\Delta A = \mu_0 J_0 \sin(p\phi) \delta(\rho - R_s) , \quad (1)$$

где $\delta(\rho - R_s)$ - дельта функция.

При этом решение уравнения (1) должно удовлетворять граничным условиям на поверхности раздела сред с различными магнитными проницаемостями /2/:

$$[B_\rho] = 0 ; [H_\phi] = 0 .$$

Таким образом, при расчете магнитного поля в активной зоне генератора можно выделить следующие области (см. рис. 2), отличающиеся электрическими и магнитными свойствами (используется полярная система координат):

1. $0 \leq \rho \leq R_s$ — область статора генератора ($\mu \rightarrow \infty$);
2. $R_s \leq \rho \leq R_r$ — область воздушного зазора ($\mu = 1$);
3. $R_r \leq \rho \leq R_o$ — область постоянных магнитов ($B = \mu_0 H + M$);
4. $R_o \leq \rho$ — область обоймы, удерживающей ПМ ($\mu \rightarrow \infty$).

Поправка на параметры генератора за счет конечного размера зубцовой зоны и спинки статора может быть найдена по теории магнитных цепей на основе решений, полученных в данной постановке.

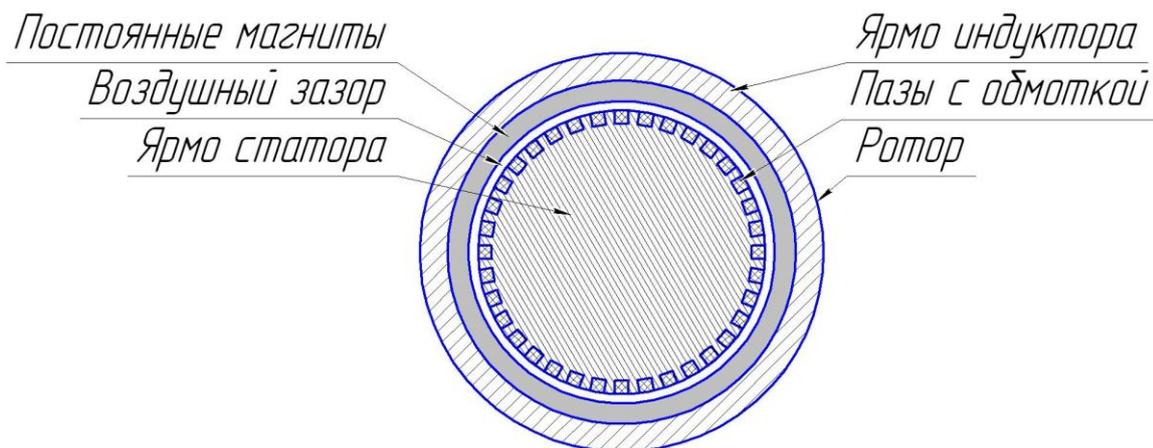


Рисунок 1. Схема многополюсного синхронного генератора обращенной конструкции.

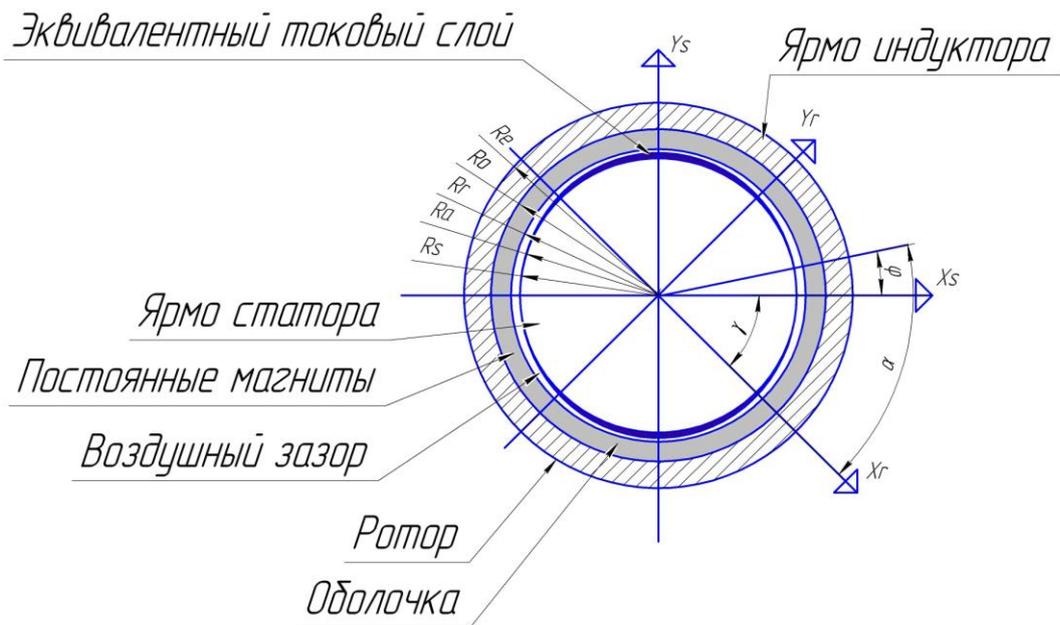


Рисунок 2. Расчетная схема синхронного генератора обращенной конструкции.

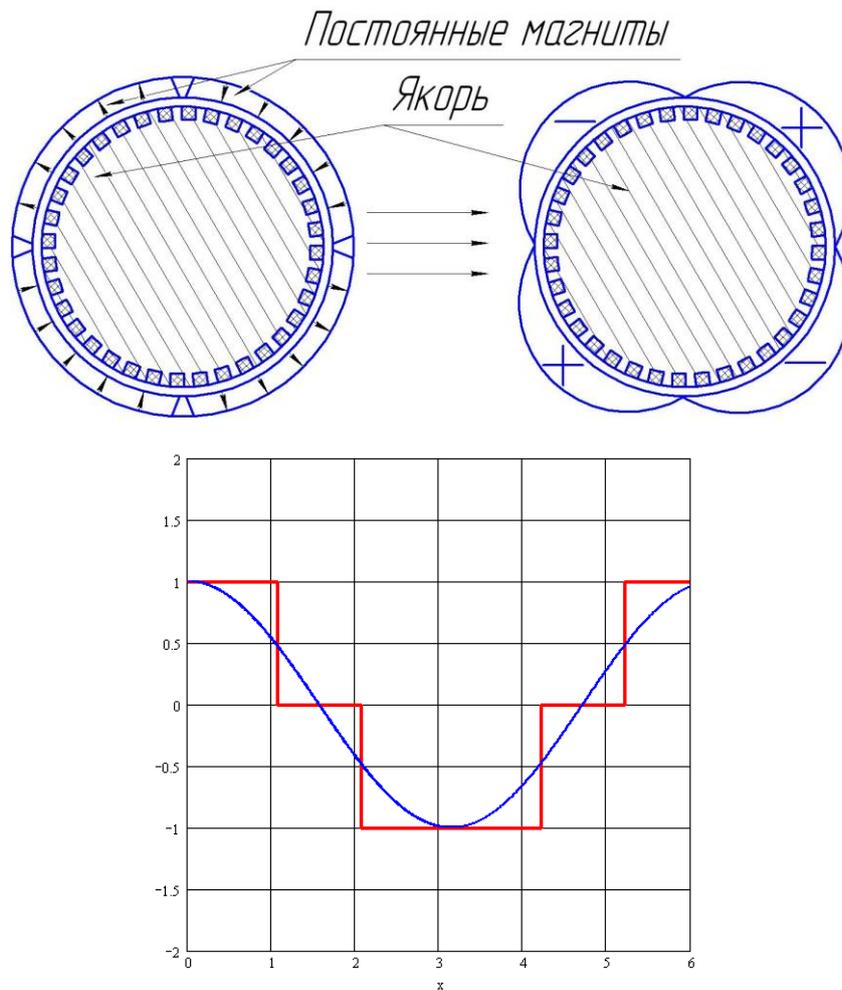


Рисунок 3. Представление намагниченности ПМ.

Расчет двумерных полей в активной зоне СГ ВЭУ.

В области воздушного зазора ($R_s \leq \rho \leq R_r$) решение уравнения (1) для первой гармоники разложения в ряд Фурье векторного магнитного потенциала имеет вид /3/:

$$A_\delta = \frac{\mu_0 m i_m W_a K_a}{2p\pi} \left\{ \left[\left(\frac{\rho}{R_s} \right)^{\pm p} + a_p \rho^p + b_p \rho^{-p} \right] \sin(p\phi) + (c_p \rho^p + d_p \rho^{-p}) \cos(p\phi) \right\}. \quad (2)$$

Здесь: μ_0 – магнитная проницаемость вакуума; i_m – амплитудное значение тока статора; m – число фаз; W_a – число витков фазы; K_a – обмоточный коэффициент; p – число пар полюсов; a_p, c_p, b_p, d_p – неизвестные константы. Знак “+” соответствует области внутри токового слоя ($\rho < R_s$). Знак “-” соответствует области вне токового слоя ($\rho > R_s$).

Граничное условие $[H_\tau]=0$ на поверхности статора ($\rho=R_s$) записывается как:

$$H_\phi \Big|_{R_s} = - \frac{1}{\mu_0} \frac{\partial A_\delta}{\partial \rho} \Big|_{R_s} = 0 \quad (3)$$

Так как граница статор – воздушный зазор лежит внутри токового слоя, т.е. $\rho=R_s$, то в выражении (2) используется знак “+”:

$$A_\delta = \frac{\mu_0 m i_m W_a K_a}{2p\pi} \left\{ \left[\left(\frac{\rho}{R_s} \right)^p + a_p \rho^p + b_p \rho^{-p} \right] \sin(p\phi) + (c_p \rho^p + d_p \rho^{-p}) \cos(p\phi) \right\} \quad (4)$$

Решая (3) с учетом (4) относительно b_p и d_p , получим уравнения для связи констант b_p и a_p, c_p и d_p :

$$\begin{cases} d_p = c_p R_s^{2p} \\ b_p = a_p R_s^{2p} + R_s^p \end{cases} \quad (5)$$

Подставляя (5) в (4) получим:

$$A_\delta = \frac{\mu_0 m i_m W_a K_a}{2p\pi} \left\{ \left[\left(\frac{\rho}{R_s} \right)^{-p} + a_p \rho^p + a_p \frac{R_s^{2p}}{\rho^p} + \frac{R_s^p}{\rho^p} \right] \sin(p\phi) + c_p \left(\rho^p + \frac{R_s^{2p}}{\rho^p} \right) \cos(p\phi) \right\} \quad (6)$$

Структура решения в магнитной оболочке.

Предполагаем, что магнитный момент $M\{0, M_\rho\}$ ПМ имеет только радиальную компоненту и синусоидально меняется по угловой координате α , отсчитываемой в системе координат ротора (см. рис. 3), что соответствует первой гармонике разложения ряд Фурье меандра распределения намагниченности ПМ.

В этом случае можно принимать, что намагниченность ПМ может быть задана как:

$$M = M_0 \frac{R_r}{\rho} \cos(\alpha), \quad (7)$$

где M_0 — магнитный момент постоянных магнитов. Задание намагниченности ПМ в данной форме позволяет удовлетворить условию сохранения магнитного потока по радиальной компоненте. При этом, как будет показано ниже, могут быть получены простые аналитические соотношения для распределения магнитного поля в активной зоне машины.

Угол α в системе координат ротора связан с углом ϕ , отсчитываемым в системе координат статора следующим соотношением (см. рис. 2):

$$\alpha = p\phi + p\gamma,$$

где γ — угол поворота системы координат ротора относительно системы координат статора.

Связь компонент магнитной индукции с напряженностью магнитного поля в магнитной оболочке записывается как:

$$\begin{cases} B_r = \mu_0 H_\rho + M \\ B_\phi = \mu_0 H_\phi \end{cases} \quad (8)$$

Решение о распределении векторного магнитного потенциала в магнитной оболочке может быть найдено из соответствующего уравнения Максвелла $\text{rot}\mathbf{H}=0$:

$$\text{rot}\mathbf{H} = i_z \left\{ \frac{1}{\rho} \frac{\partial(\rho H_\phi)}{\partial\rho} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial H_\rho}{\partial\phi} \right\} = 0. \quad (9)$$

Учитывая соотношения для компонент напряженности магнитного поля

$$H_\phi = \frac{1}{\mu_0} B_\phi = \frac{1}{\mu_0} \left(-\frac{\partial A}{\partial\rho} \right); \quad H_\rho = \frac{1}{\mu_0} (B_\rho - M) = \frac{1}{\mu_0} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial A}{\partial\phi} - M_0 \frac{Rr}{\rho} \cos(p\phi + p\gamma) \right) \quad \text{и}$$

подставляя их в (9), получим уравнение для определения векторного магнитного потенциала A в зоне ПМ:

$$\frac{\partial}{\partial\rho} \left(\rho \frac{\partial A}{\partial\rho} \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 A}{\partial\phi^2} = -M_0 p \frac{Rr}{\rho} \sin(p\phi + p\gamma). \quad (10)$$

Общее решение уравнения (10) имеет вид:

$$A_m(\rho, \phi) = \frac{M_0 Rr}{p} \sin(p\phi + p\gamma) + [d_1 \rho^p + d_2 \rho^{-p}] \sin(p\phi) + [d_3 \rho^p + d_4 \rho^{-p}] \cos(p\phi), \quad (11)$$

где d_1, d_2, d_3, d_4 — неизвестные константы.

Для определения неизвестных констант рассмотрим граничные условия на границе раздела сред:

- граничные условия на поверхности ротора ($\rho=R_r$):

$$[B_n]_{\rho=R_r} = 0, \quad \left. \frac{1}{\rho} \frac{\partial A_\delta}{\partial\phi} \right|_{\rho=R_r} = \left. \frac{1}{\rho} \frac{\partial A_m}{\partial\phi} \right|_{\rho=R_r} \quad (12)$$

$$[H_\tau]_{\rho=R_r} = 0, \quad -\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial A_\delta}{\partial \rho} \Big|_{\rho=R_r} = -\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial A_m}{\partial \rho} \Big|_{\rho=R_r} \quad (13)$$

- граничные условия на границе постоянные магниты – оболочка ($\rho=R_o$):

$$[B_n]_{\rho=R_o} = 0, \quad [H_\tau]_{\rho=R_o} = 0, \quad \frac{\partial A_m}{\partial \rho} \Big|_{\rho=R_o} = 0 \quad (14)$$

Подставляя (11) в (14) получим выражения для d_2 и d_4 :

$$\begin{cases} d_2 = d_1 R_o^{2p} \\ d_4 = d_3 R_o^{2p} \end{cases} \quad (15)$$

Подставляя (2) и (11) с учетом (15) в (12)-(13), получим систему алгебраических уравнений для определения неизвестных констант a_p, c_p, d_1, d_3 :

$$D_f R_r^p \left[2\bar{R} + a_p R_r^p (1 + \bar{R}^2) \right] - \frac{M_0}{p} R_r R_r^p c_o - d_1 R_r^{2p} (1 + \bar{R}_1^2) = 0, \quad (16)$$

$$D_f c_p R_r^{2p} (1 + \bar{R}^2) - \frac{M_0}{p} R_r R_r^p s_1 - d_3 R_r^{2p} (1 + \bar{R}_1^2) = 0, \quad (17)$$

$$D_f R_r^p (a_p R_r^p [1 - \bar{R}^2] - 2\bar{R}) + d_1 R_r^{2p} (\bar{R}_1^2 - 1) = 0, \quad (18)$$

$$D_f c_p R_r^{2p} (1 - \bar{R}^2) + d_3 R_r^{2p} (\bar{R}_1^2 - 1) = 0. \quad (19)$$

Здесь:

$$D_f = \mu_0 I K_a / 2p, \quad \bar{R} = (R_s / R_r)^p, \quad c_o = \cos(p\phi + p\gamma), \quad s_1 = \sin(p\phi + p\gamma).$$

Решая систему (16)-(19), получим явный вид неизвестных констант a_p, c_p, d_1 и d_3 :

$$a_p = \frac{M_0 c_o R_r (\bar{R}_1^2 - 1)}{2p D_f R_r^p (\bar{R}_1^2 - \bar{R}^2)} - \frac{2\bar{R}}{R_r^p (\bar{R}^2 - \bar{R}_1^2)}, \quad (20)$$

$$c_p = \frac{M_0 s_1 R_r (\bar{R}_1^2 - 1)}{2p D_f (\bar{R}_1^2 - \bar{R}^2) R_r^p}, \quad (21)$$

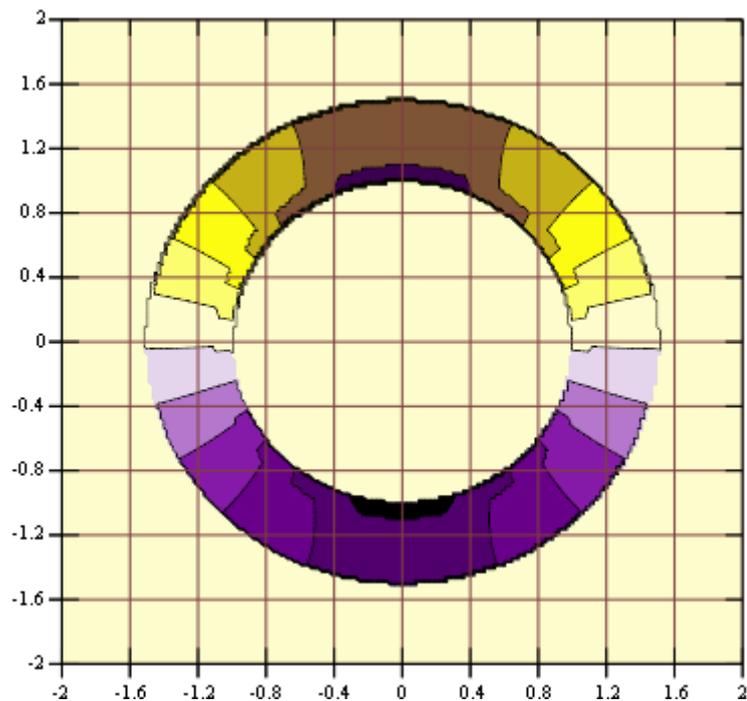
$$d_1 = \frac{M_0 c_o R_r (\bar{R}^2 - 1)}{2p (\bar{R}_1^2 - \bar{R}^2) R_r^p} - \frac{2D_f \bar{R}}{R_r^p (\bar{R}^2 - \bar{R}_1^2)}, \quad (22)$$

$$d_3 = \frac{M_0 s_1 R_r (\bar{R}^2 - 1)}{2p R_r^p (\bar{R}_1^2 - \bar{R}^2)} \quad (23)$$

Результаты расчета распределения магнитных полей.

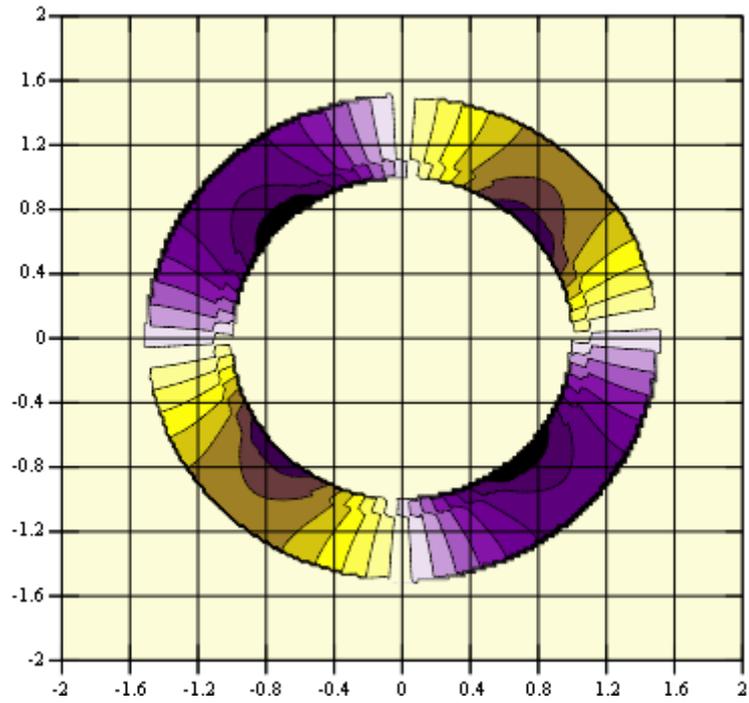
На основе полученного решения для распределения магнитных полей в активной зоне СГ с ПМ обращенной конструкции можно построить распределения векторного магнитного потенциала при различном числе пар полюсов p . На рис. 4-7 представлены расчеты распределения векторного магнитного потенциала в активной зоне синхронной машины с ПМ при различном числе пар полюсов p .

Из рисунков видно, что при увеличении числа пар полюсов p распределение векторного магнитного потенциала становится существенно неоднородным. При больших p ($p > 5$) распределение локализовано в основном в области воздушного зазора и быстро затухает вне его.



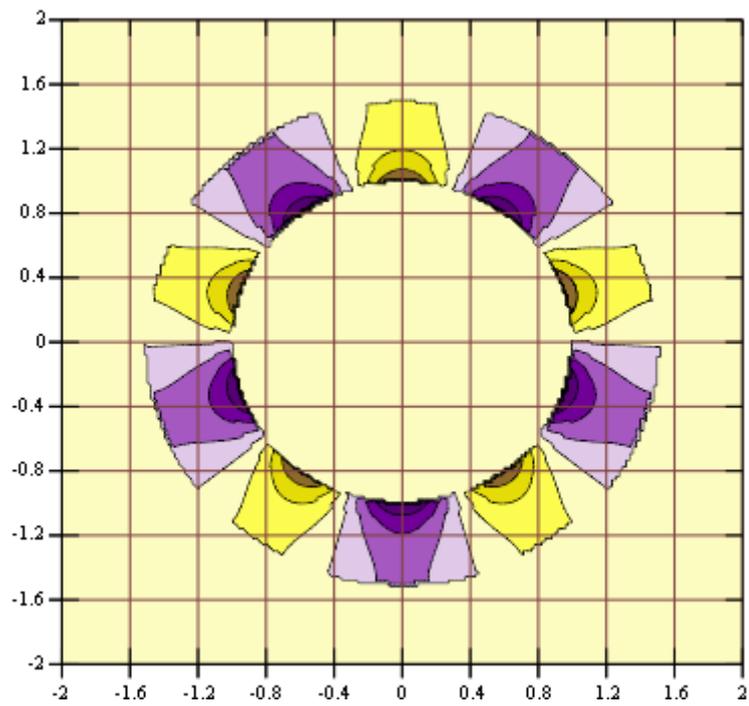
AS

Рисунок 4. Картина распределения магнитного поля в активной зоне СГ с ПМ при $p=1$.



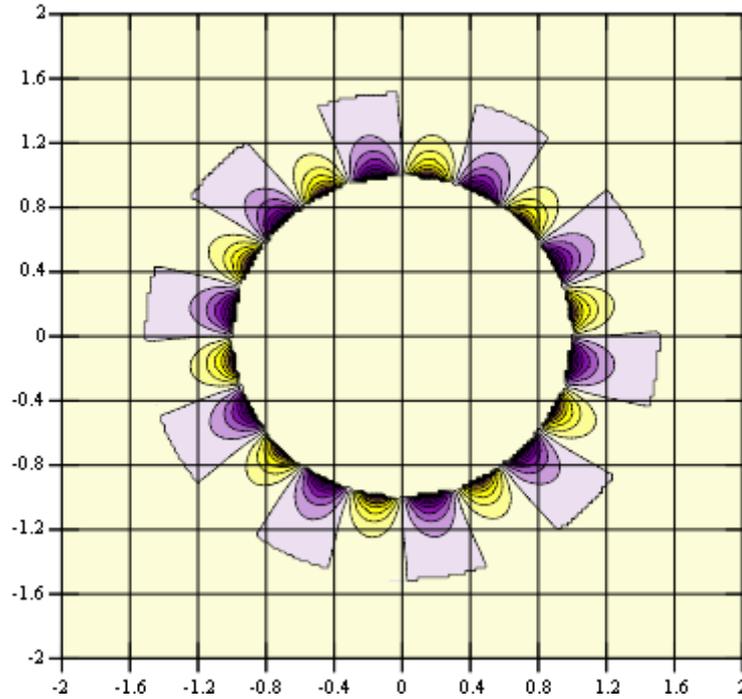
AS

Рисунок 5. Картина распределения магнитного поля в активной зоне СГ с ПМ при $p=2$.



AS

Рисунок 6. Картина распределения магнитного поля в активной зоне СГ с ПМ при $p=5$.



AS

Рисунок 7. Картина распределения магнитного поля в активной зоне СГ с ПМ при $p=10$.

Определение основных параметров СГ с ПМ обращенной конструкции.

Данный тип машин относится к неявнополюсным машинам, поэтому главные индуктивные сопротивления по осям d и q совпадают ($X_{ad}=X_{aq}=X_a$). Основными параметрами машины являются ЭДС холостого хода E_0 и главное индуктивное сопротивление X_a .

Для определения главного индуктивного сопротивления X_a найдем энергию магнитного поля в активной зоне машины от токов статора при нулевых значениях намагниченности ПМ ($M_0=0$). Это означает, что в выражении (20) для a_p $M_0=0$.

Энергия магнитного поля в активной зоне машины определяется как [3]:

$$W = \frac{1}{2} L_s R_s \int_0^{2\pi} J_0 \sin(p\phi) A_\delta \Big|_{\rho=R_s} d\phi \quad (24)$$

После интегрирования получаем выражение для энергии магнитного поля в активной зоне машины:

$$W = \frac{1}{2} L_s \frac{m^2 i_m^2 W_a^2 K_a^2 \mu_0}{\pi p} \left(1 + \frac{2\bar{R}^2}{R_1^2 - \bar{R}^2} \right). \quad (25)$$

Здесь $J_0 = \frac{m i_m W_a K_a}{\pi R_s}$ - токовая нагрузка статора; L_s - активная длина машины.

Энергия одной фазы находится как отношение полной энергии к числу фаз.

Используя соотношение для энергии одной фазы $W_1 = LI_c^2/2$, а также $X_a = \omega L$, где $I_c = i_m \sqrt{2}$ - действующее значение тока статора, получим выражение для главного индуктивного сопротивления X_a

$$X = 2\omega L_s \frac{mW_a^2 K_a^2 \mu_0}{\pi p} \left(1 + \frac{2\bar{R}^2}{R_1^2 - \bar{R}^2} \right). \quad (26)$$

Действующее значение ЭДС ротора E_0

Действующее значение ЭДС ротора E_0 находится через поток от магнитов при нулевых значениях тока статора с помощью следующих соотношений /3/:

$$E_0 = \pi \sqrt{2} K_a W_a f \Phi_m, \quad (27)$$

$$\Phi_m = \frac{2}{\pi} \tau L_s B_m, \quad (28)$$

$$\tau = \frac{\pi}{p} R_s, \quad (29)$$

Здесь τ – полюсное деление, B_m – амплитудное значение радиальной составляющей магнитной индукции в воздушном зазоре на радиусе якоря машины $\rho = R_s$.

В воздушном зазоре выражение для максимума магнитной индукции имеет вид:

$$B_m = \frac{1}{\rho} \frac{\partial A_\delta}{\partial \phi} \Big|_{\rho=R_s}. \quad (30)$$

Подставляя (29) и (28) в (27) с учетом (30) при токе статора $I=0$, получим выражение для ЭДС ротора:

$$E_0 = \pi 2 \sqrt{2} K_a W_a f L_s \frac{1}{p} \frac{R_s M_0 (\bar{R}_1^2 - 1) \bar{R}}{\bar{R}_1^2 - \bar{R}^2} \quad (31)$$

Используя выражения (26) и (31), можно построить зависимости индуктивного сопротивления и ЭДС холостого хода от количества пар полюсов p (рис. 8-9). В данных расчетах принималось одинаковое значение числа витков фазы W_a при различных p .

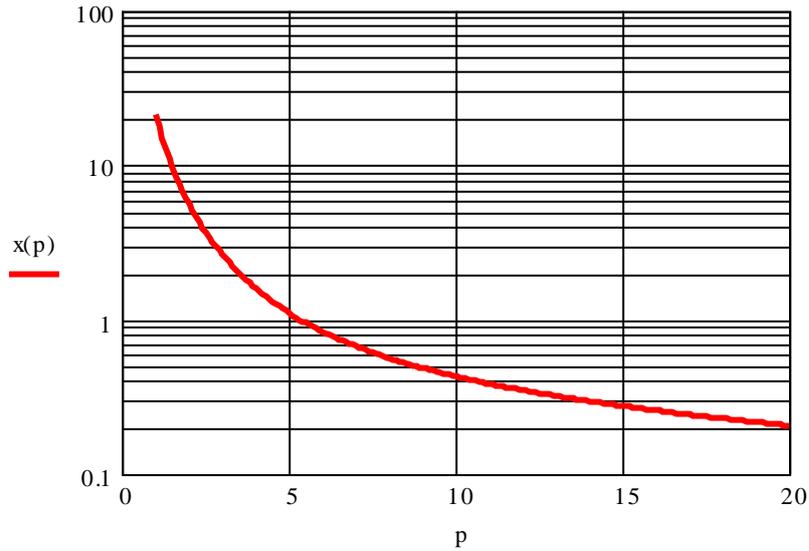


Рисунок 8. Зависимость главного индуктивного сопротивления X_a от количества пар полюсов p .

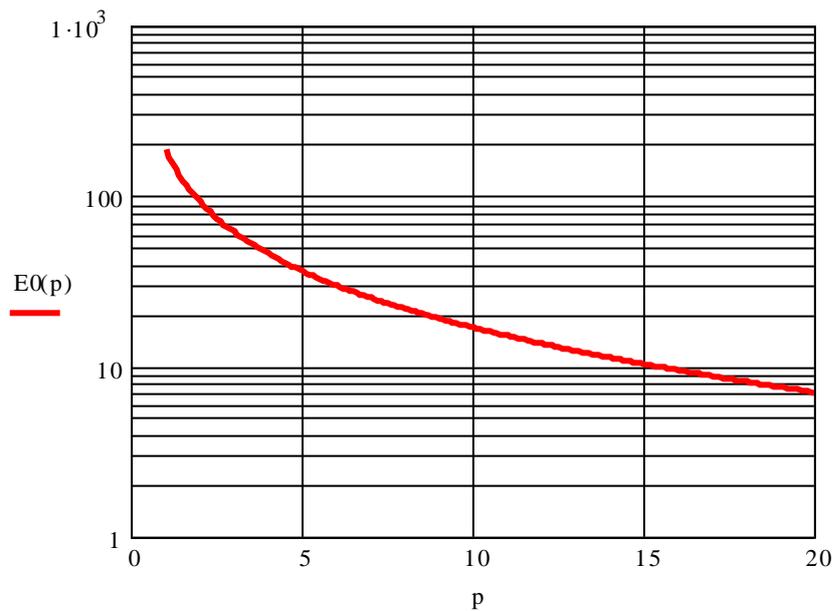


Рисунок 9. Зависимость ЭДС холостого хода от количества пар полюсов p .

Из рисунков (8) и (9) видно, что с увеличением числа пар полюсов p индуктивное сопротивление уменьшается, ЭДС холостого хода так же с ростом числа пар полюсов уменьшается.

Внешняя характеристика генератора для трех видов нагрузки представлена на рис. 10: $UL(I)$ – индуктивная нагрузка, $UC(I)$ – емкостная нагрузка, $UR(I)$ – активная нагрузка.

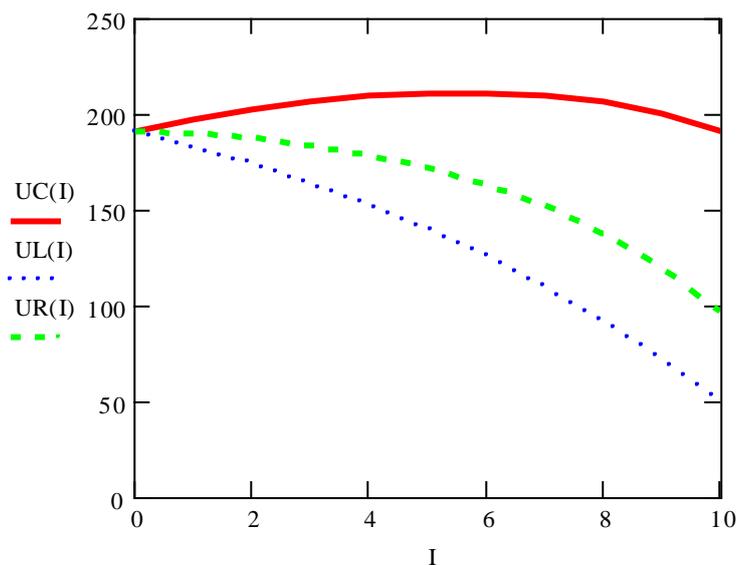


Рисунок 10. Внешняя характеристика СГ обращенной конструкции с ПМ.

Расчет проекта СГ с ПМ обращенной конструкции для ВЭУ.

На основе полученных аналитических выражений для ЭДС холостого хода E_0 и главного индуктивного сопротивления X_a был выполнен оценочный расчет СГ с ПМ обращенной конструкции для ВЭУ мощностью 10 МВА. Расчет был выполнен для заданных климатических условий работы ВЭУ /4, 5/: $u_0=15$ м/с – скорость ветра, $\rho=1,213$ кг/м³ – плотность воздуха на высоте 100 м.

Исходя из заданной мощности ВЭУ P , определяем необходимую площадь ветроколеса $A_1 = 2P_0 / \rho u_0$, P_0 – необходимая мощность ветрового потока, необходимый диаметр ветроколеса $D = 2\sqrt{A_1/\pi}$. Как правило, оптимальная геометрия ветроколеса выбирается, исходя из условий и режимов эксплуатации ВЭУ. Учитывая заданную скорость ветра и параметры ветроколеса, определяем скорость вращения индуктора СГ с ПМ $n = 60\Omega/2\pi$, здесь $\Omega = Z u_0/R$ – частота вращения вала, м/с, где Z – быстроходность ветроколеса, u_0 – скорость ветра, R – диаметр ветроколеса.

В качестве исходных данных принимаем следующие значения:

- величина выходного напряжения: $U=6000$ В;
- величина воздушного зазора $\delta=0,01$ м.;
- толщину магнитной оболочки $\Delta_m=0.5$ м.;
- радиус расточки статора R_s ;
- относительная длина машины $\lambda=1$;
- число пар полюсов $p=40$.

Далее, используя соотношение для выходной мощности генератора $P_2 = IU_m \cos(\varphi)$, определим номинальный ток обмотки якоря $I_{оя}$.

На основе полученных значений составлена методика уточнения параметров СГ. В результате получены следующие параметры синхронного генератора обращенной конструкции на основе ПМ для ВЭУ мощностью 10 МВА. (табл.1).

Таблица 1	
Параметры СГ с ПМ обращенной конструкции для ВЭУ мощностью 10 МВА	
Параметр	Значение
Мощность, МВА	10
Расчетная скорость ветра, м/с	28
Радиус ветроколеса, м	80
Расчетная скорость вращения индуктора, об/мин	15
Выходное напряжение U , В	6000
Ток $I_{оя}$, А	143
Радиус статора R_s , м	5,3
Радиус ротора R_r , м	5,31
Радиус обоймы, удерживающей магниты R_o , м	5,81
Воздушный зазор δ , мм	10
Толщина магнитов Δt , мм	500
Число пар полюсов p	40
Активная длина машины L_s , м	11,355
Число пазов на полюс и фазу q	1
Число пазов якоря Z_s	960
Электрическая частота f , Гц	10

На рис. 11 приведена внешняя характеристика СГ с ПМ обращенной конструкции мощностью 10 МВА.: $UL(I)$ – индуктивная нагрузка, $UC(I)$ – емкостная нагрузка, $UR(I)$ – активная нагрузка.

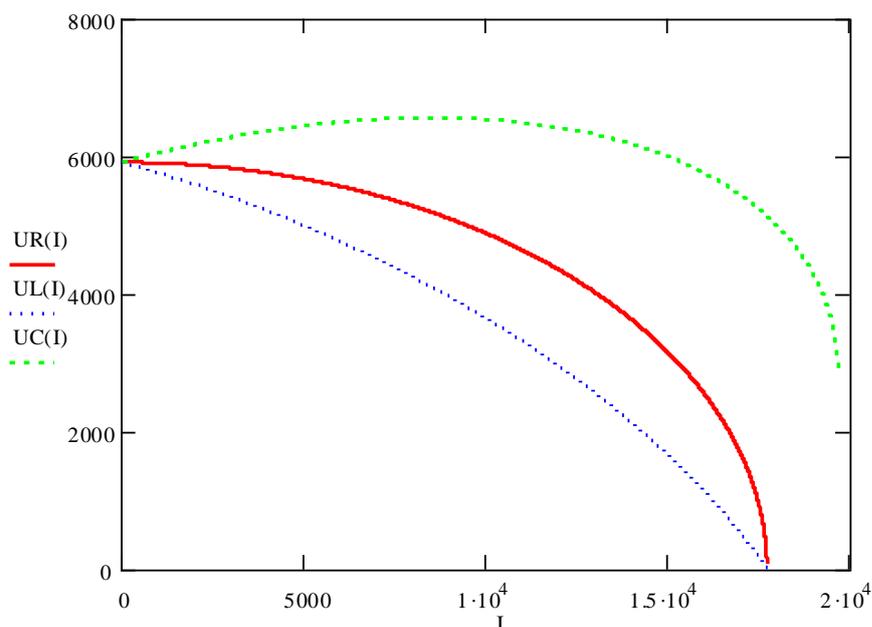


Рисунок 11. Внешняя характеристика СГ с ПМ обращенной конструкции мощностью 10 МВА

Таким образом, данная методика позволяет оценить геометрические размеры генератора, критические токи якоря и металлоемкость изделия.

Заключение.

Получены аналитические соотношения для расчета двумерных магнитных полей в активной зоне синхронного генератора с ПМ. На основе решения задач о распределении магнитных полей получены аналитические соотношения для расчета главного индуктивного сопротивления и ЭДС холостого хода таких генераторов. Построенные аналитические решения для выходных параметров электрической машины с ПМ позволяют проводить детальные расчеты выходных характеристик синхронной машины с учетом количества пар полюсов, размеров и параметров постоянных магнитов и режима работы генератора. Полученная методика расчета генератора позволяет оценить размеры генератора, токи якоря и металлоемкость изделия.

Библиографический справочник

1. Бут Д. А., «Основы электромеханики», Москва, изд-во МАИ, 1996, 468с.
2. Иванов-Смоленский А.В.. Электрические машины. Том 2. Москва, издательство МЭИ, 2006, 532с.
3. Ковалев Л.К., Ковалев К.Л., Конеев С.М.-А.. Электрические машины и устройства на основе массивных высокотемпературных сверхпроводников. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010, 396с.
4. Удалов С.Н.. Возобновляемые источники энергии. Изд-во НГТУ, 2007, 432с.
5. Виссарионов В.И., «Методы расчёта ресурсов возобновляемых источников энергии», Москва, изд-во МЭИ, 2009 г, 144с.