



УДК 621.311  
DOI: 10.25206/1813-8225-2021-175-32-38

**А. А. ТАТЕВОСЯН**

Омский государственный  
технический университет,  
г. Омск

## НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ТИХОХОДНЫХ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ ДЛЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

В работе под научными основами проектирования тихоходных синхронных генераторов на постоянных магнитах (СГПМ) в составе ветроэнергетических установок (ВЭУ) понимается система научных знаний, которая составляет теоретическую базу практики конструирования сложного объекта, каким является ВЭУ, состоящая из взаимосвязанного оборудования и сооружений, предназначенных для преобразования энергии ветра в электрическую энергию. В настоящее время разработке перспективных конструкций ВЭУ во всем мире уделяется повышенное внимание, например, в Российской Федерации перспективным направлением является создание автономных ВЭУ с тихоходными СГПМ средней и малой мощности, имеющими максимальный спектр сфер применения по виду деятельности и климатических зон на всей территории. Однако инженерные подходы к проектированию отдельных компонентов ВЭУ свидетельствуют о сложностях разработки научно обоснованной методологии оптимизации параметров ВЭУ как единого целого, учитывающей взаимовлияние отдельных компонентов друг на друга. При этом под методологией оптимизации параметров ВЭУ понимается инструментальный аппарат научных основ конструирования, учитывающий показатели качества и критерии оптимальности, энергетические и технические характеристики, а также этапы проектирования с результатами предварительных и поверочных расчетов. Для стадии поверочных расчетов параметров ВЭУ научные основы конструирования определяются построением математических моделей и их исследований с помощью пакетов прикладных программ для ПК, тогда как для стадии предварительных расчетов имеет значение развитие аналитических методов анализа.

В данной статье рассматриваются научные основы проектирования СГПМ в составе ВЭУ на стадии предварительных расчетов, сформулирована задача оптимизации параметров тихоходных ВЭУ, предложены уравнения взаимосвязи конструктивных параметров с энергетическими показателями работы ВЭУ, обеспечивающие максимум КПД синхронных генераторов с учетом заданных технических условий.

Повышение требований к разработке высокоэффективных, надежных и экономичных ветроэнергетических установок (ВЭУ) с использованием тихоходных синхронных генераторов на постоянных магнитах (СПМ) является результатом потребительского спроса на возобновляемые источники энергии, а именно энергию ветра [1–6].

В данной статье научные основы конструирования тихоходных СПМ в составе ВЭУ рассмотрены на примере решения задачи оптимизации параметров их магнитной системы, обеспечивающей максимально возможный КПД с учетом условий технического задания на проектирование.

Многообразие возможных вариантов конструктивного исполнения тихоходных СПМ в составе ВЭУ существенно усложняет задачу оптимизации их параметров. Поэтому на стадии предварительных расчетов оптимальной конструкции синхронного генератора возникает необходимость выбора базового варианта схемного решения СПМ с использованием критического анализа и эвристических методов поиска [7–15]. В основе оптимизации параметров СПМ является построение математической модели, описывающей физические процессы, протекающие в электромагнитной и механической подсистемах синхронного генератора. Задание закона угловой скорости вращения ротора во времени  $\omega = \omega_0(t)$  в качестве начального приближения ведет к упрощению анализа физических процессов в СПМ в составе ВЭУ. Определение начального приближения электромагнитного момента  $M_{эм} = M_{эм}(t)$  независимо от процессов в механической части позволяет на стадии предварительных расчетов найти первое, отличающееся от начального, приближение закона скорости вращения ротора  $\omega = \omega_1(t)$ . Оценка расчета по среднеквадратичному отклонению

$$\varepsilon_0 = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (\omega_1 - \omega_0)^2 dt} \quad (1)$$

дает возможность сделать заключение о близости принятого приближения  $\omega = \omega_0(t)$  к полученному на первом шаге итерационного процесса  $\omega_1(t)$ . Процедура приближений повторяется до тех пор, пока величина ошибки  $\varepsilon_0$  не будет превышать заданного значения. Описанный итерационный процесс представляет суть метода Шварца, с помощью которого производится сведение решения общей задачи к последовательности решений стандартных задач на каждом шаге итерации. Этот метод успешно апробирован для раздельного рассмотрения процессов в электрической и механической частях электромагнитного и магнитоэлектрического приводов возвратно-поступательного движения поршневого компрессора [16, 17].

При описании идеализированной синхронной машины во вращающихся координатных осях  $d$  и  $q$  напряжение  $\dot{U}$  в нагрузке, снимаемое с зажимов генератора, равно сумме всех ЭДС за вычетом падения напряжения на активном сопротивлении обмотки якоря [18, 19]

$$\dot{U} = \dot{E}_0 + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} + \dot{E}_{\sigma a} - \dot{I}R_a, \quad (2)$$

где  $\dot{E}_0$  — ЭДС от основного магнитного потока индуктора  $\dot{\Phi}_0$ ;  $\dot{E}_{ad} = -jI_d X_{ad}$  и  $\dot{E}_{aq} = -jI_q X_{aq}$  — соответственно ЭДС от потоков реакции якоря  $\dot{\Phi}_{ad}$  и  $\dot{\Phi}_{aq}$ ;  $\dot{E}_{\sigma a} = -jIX_{\sigma a}$  — ЭДС от потока рассеяния  $\dot{\Phi}_{\sigma a}$ ;  $\dot{I} = \dot{I}_d + \dot{I}_q$  — ток в обмотке якоря, причем ток  $\dot{I}_d$  создает поток реакции якоря  $\dot{\Phi}_{ad}$ , а ток  $\dot{I}_q$  — соответственно  $\dot{\Phi}_{aq}$ ;  $R_a$  — активное сопротивление обмотки якоря;  $X_{ad}$ ,  $X_{aq}$  — продольное и поперечное синхронное индуктивное сопротивление обмотки якоря, причем для явнополюсного ротора  $X_{ad} > X_{aq}$ , если ротор неявнополюсный, то  $X_{ad} = X_{aq}$ ;  $X_{\sigma a}$  — индуктивное сопротивление рассеяния обмотки якоря.

При введении параметров полного продольного  $X_d = X_{ad} + X_{\sigma s}$  и поперечного индуктивных сопротивлений синхронного генератора уравнение (2) принимает вид:

$$\dot{U} = \dot{E}_0 - j\dot{I}_q X_q - j\dot{I}_d X_d - \dot{I}R_a. \quad (3)$$

Соответствующая уравнению (3) векторная диаграмма СПМ при активно-индуктивной нагрузке представлена на рис. 1.

На векторной диаграмме (рис. 1) сумму векторов напряжений на индуктивных сопротивлениях продольной и поперечной реакции якоря можно заменить вектором напряжения на эквивалентном индуктивном сопротивлении обмотки якоря

$$jX_q \dot{I}_q + jX_d \dot{I}_d = jX_a \dot{I}. \quad (4)$$

Тогда уравнение электрического равновесия фазы обмотки якоря СПМ в комплексной форме записи будет

$$\dot{U} = \dot{E}_0 - \dot{I}R_a - jX_a \dot{I}. \quad (5)$$

Из векторной диаграммы СПМ (рис. 1) определим

$$IX_a = \sqrt{(I_q X_q)^2 + (I_d X_d)^2}; \\ I_d = I \sin(\theta + \phi); I_q = I \cos(\theta + \phi). \quad (6)$$

При этом эквивалентное индуктивное сопротивление обмотки якоря

$$X_a = \omega L_a = \sqrt{X_q^2 \cos^2(\theta + \phi) + X_d^2 \sin^2(\theta + \phi)}. \quad (7)$$

С учетом (7) уравнение электрического равновесия обмотки якоря (5) для мгновенных значений тока, напряжения и ЭДС примет вид:

$$u = e_0 - iR_a - L_a \frac{di}{dt}. \quad (8)$$

Составим уравнение баланса мощности фазы обмотки якоря на периоде  $T$

$$\frac{1}{T} \int_0^T e_0(t) i dt = \frac{1}{T} \int_0^T i^2 R_a dt + \\ + \frac{1}{T} \int_0^T \frac{d}{dt} \left[ \frac{L_a i^2}{2} \right] dt + \frac{1}{T} \int_0^T u(t) i dt. \quad (9)$$

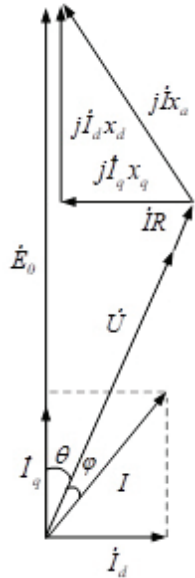


Рис. 1. Векторная диаграмма СГПМ для случая активно-индуктивной нагрузки

Очевидно, что второе слагаемое в правой части полученного уравнения тождественно равно нулю. Коэффициент полезного действия СГПМ

$$\eta_r = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T uidt}{\frac{1}{T} \int_0^T [i^2 R_a + ui] dt} \quad (10)$$

В выражении (10) определим временные зависимости напряжения  $u(t)$  и тока  $i(t)$  в обмотке якоря, принадлежащие некоторому классу допустимых функций, доставляющие максимум функционалу

$$\eta_r = (1 + P_r)^{-1} \quad (11)$$

где  $P_r = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 R_a dt}{\frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t) dt}$  — относительные потери.

Очевидно, что отыскание оптимальной функции тока  $i(t)$  в функционале (11) можно найти из условия минимума  $P_r$ . Поскольку  $P_r$  есть число, устанавливающее относительные потери, то введем его под знак интеграла

$$\frac{1}{T} \int_0^T [P_r u(t)i(t) - i^2(t)R_a] dt = 0 \quad (12)$$

Учтем, что в момент времени  $t = t_k$ , где  $t_k$  — корень функции

$$P_r u(t)i(t) - i^2(t)R_a = 0 \quad (13)$$

относительные потери достигают своего экстремума (точки минимума), то есть

$$\frac{dP_r(t_k)}{dt_k} = 0 \quad (14)$$

Тогда

$$P_r(t_k) = \frac{2i(t_k) \cdot i'(t_k) \cdot R_a}{u'(t_k) \cdot i(t_k) + i'(t_k) \cdot u(t_k)} \quad (15)$$

После подстановки выражения (15) в (13) получим уравнение для определения корня  $t = t_k$

$$u'(t_k) \cdot i(t_k) - i'(t_k) \cdot u(t_k) = 0 \quad (16)$$

Анализ решения уравнения (16) показывает, что минимально возможные относительные потери СГПМ имеют место, когда сдвиг фаз между напряжением и током в нагрузке будет равен нулю, то есть характер нагрузки синхронного генератора является чисто активным. Это легко проверить. Предположим, что ток и напряжение в нагрузке сдвинуты по фазе на угол  $\phi$ .

Тогда

$$\begin{cases} i(t) = I_m \sin(\omega t) \\ u(t) = U_m \sin(\omega t + \phi) \end{cases} \quad (17)$$

Подстановка (17) в уравнение (16) дает уравнение

$$\begin{aligned} & \cos(\omega t_k) \sin(\omega t_k + \phi) - \\ & - \cos(\omega t_k + \phi) \sin(\omega t_k) = 0 \end{aligned} \quad (18)$$

Преобразуя в (18) функции синуса и косинуса суммы углов  $\omega t_k + \phi$ , получим уравнение  $\sin(\phi) = 0$ , из которого находим  $\phi = 0$ , что соответствует режиму синхронного генератора при активной нагрузке.

Подстановка (17) в (15) позволяет определить относительные потери

$$P_r = \frac{I_m R_a \sin(2\omega t_k)}{U_m [\sin(2\omega t_k) \cos \phi + \cos(2\omega t_k) \sin \phi]} \quad (19)$$

При угле сдвига фаз  $\phi = 0$  относительные потери будут

$$P_r(t_k) = \frac{R_a}{R_n} \quad (20)$$

С учетом (20) минимально возможные относительные потери СГПМ при номинальных значениях напряжения  $U_{ном}$  и тока  $I_{ном}$

$$P_{r\text{опт}} = \frac{I_{ном} R_a}{U_{ном}} = \frac{I_{ном} R_a}{u^* \cdot E_0} \quad (21)$$

где  $u^*$  — относительное напряжение в нагрузке,  $E_0$  — действующее значение ЭДС в обмотке статора.

Для расчета номинальной мощности тихоходного СГПМ в режиме активной нагрузки введем в рассмотрение коэффициент использования  $k_u$  [19]

$$S_{ном} = P_{ном} = m U_{ном} I_{ном} = k_u m E_0 I_k \quad (22)$$

где  $m$  — число фаз;  $I_k = \frac{E_0}{\sqrt{R_a^2 + X_a^2}}$  — ток короткого замыкания.

Из векторной диаграммы (рис. 1) для номинального режима работы СГПМ при активной нагрузке

$$E_0 = \sqrt{(U_{ном} + I_{ном} R_a)^2 + (I_{ном} X_a)^2}. \quad (23)$$

Решая уравнение (23) относительно тока, найдем

$$I_{ном} = I_k \left[ -\frac{u^* R_a}{\sqrt{R_a^2 + X_a^2}} + \sqrt{1 - \frac{u^{*2} X_a^2}{R^2 + X_a^2}} \right]. \quad (24)$$

После подстановки (24) в (22) получим выражение для коэффициента использования

$$k_u = u^* \left[ \sqrt{1 - \frac{u^{*2} Q_g^2}{1 + Q_g^2}} - \frac{u^*}{\sqrt{1 + Q_g^2}} \right], \quad (25)$$

где  $Q_g = \frac{X_a}{R_a}$  — добротность обмотки якоря.

Анализ выражений (25) и (22) показывает, что от значения коэффициента использования зависит мощность тихоходного СГПТ и размеры его магнитной системы. Условие  $\frac{dk_u}{du^*} = 0$  позволяет определить максимальное значение мощности на выходе тихоходного СГПТ.

График зависимости  $k_u = k_u(u^*)$  показан на рис. 2. Из графика видно, что оптимальное относительное напряжение  $u_{опт}^*$  зависит от добротности обмотки якоря. Максимум коэффициента использования достигается значения 0,5 при  $u_{опт}^* = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707$ , когда сопротивление обмотки статора  $R_a = 0$  (при добротности  $Q_g \rightarrow \infty$ ).

Для конструктивной схемы СГПТ с цилиндрическим магнитопроводом (рис. 3а) действующее значение ЭДС фазы обмотки якоря имеет вид:

$$E_0 = \frac{B_\delta \cdot l' \cdot w_\phi}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\pi D_i n_0}{60} \cdot k_\phi k_{ос} \alpha', \quad (26)$$

где  $D_i$  — диаметр ротора;  $B_\delta$  — максимальное значение магнитной индукции в воздушном зазоре;  $l'$  — активная длина сердечника;  $w_\phi$  — число витков фазы обмотки якоря;  $n_0$  — синхронная частота вращения;  $k_\phi$  — коэффициент формы кривой поля, определяемый отношением действующего значения ЭДС обмотки якоря к среднему;  $\alpha'$  — коэффициент полюсного перекрытия, то есть отношение среднего значения магнитной индукции в воздушном за-

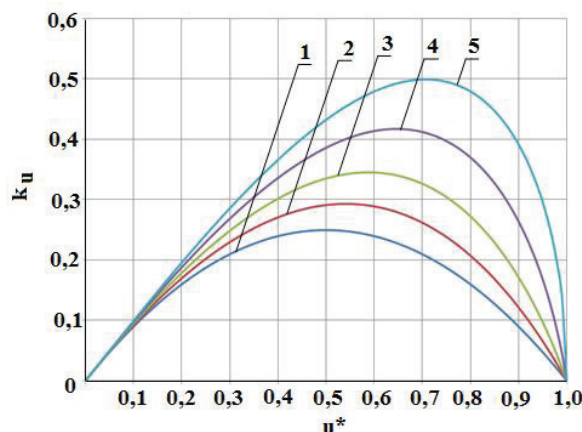


Рис. 2. К определению  $u_{опт}^*$  в зависимости от добротности обмотки якоря: 1 —  $Q_g = 1$ ; 2 —  $Q_g = 2$ ; 3 —  $Q_g = 2$ ; 4 —  $Q_g = 5$ ; 5 —  $Q_g \rightarrow \infty$

зоре к ее максимальному значению;  $k_{об}$  — обмоточный коэффициент.

Для расчета диаметра ротора  $D_i$  выполним подстановку выражения ЭДС обмотки статора (26) в (22), тогда, используя в процессе преобразования коэффициент  $\lambda = \frac{l'}{D_i}$  и линейную токовую нагрузку  $A = \frac{m I_{ном} w_\phi}{\pi D_i}$ , получим

$$D_i = \sqrt[3]{\frac{C_A \cdot P_{ном}}{2 \cdot u_{опт}^* \cdot \lambda \cdot n_{ном}}}, \quad (27)$$

где  $C_A = \frac{6,1}{A \cdot B_\delta \cdot \alpha' \cdot k_{ос} \cdot k_\phi}$  — машинная постоянная Арнольда [8].

Минимально возможные относительные потери в СГПТ определяются подстановкой выражения (26) в (21)

$$P_{г опт} = \frac{30}{\pi} \times \frac{J_{гон}}{u_{опт}^* \cdot B_\delta \cdot D_i \cdot \gamma_{нр} \cdot n_{ном} \cdot k_\phi \cdot k_{ос} \cdot \alpha' \cdot k}, \quad (28)$$

где  $J_{гон}$  — допустимая плотность тока в обмотке якоря;  $k = \frac{l'}{l_{ср}}$  — отношение расчетной длины сер-

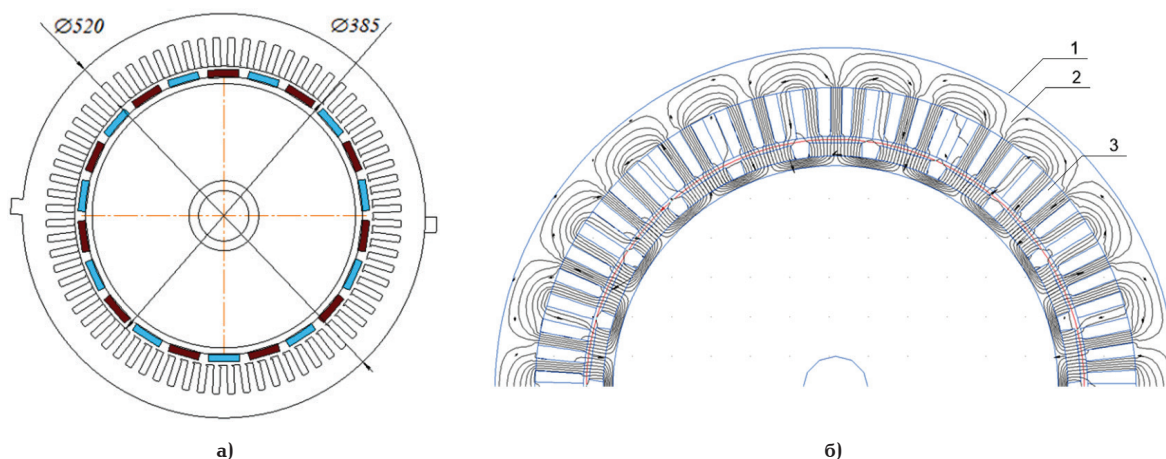


Рис. 3. Конструкция магнитной системы СГПТ с общим цилиндрическим магнитопроводом: 1 — корпус, 2 — шихтованный магнитопровод, 3 — паз; картина магнитного поля в программном обеспечении ELCUT 6.0 (б)

дечника к средней длине витка (секции) обмотки якоря.

Масса активной части витков трехфазной обмотки якоря СГПМ, работающего с максимально возможным КПД при заданном значении номинальной мощности нагрузки  $P_{ном}$ , определяется выражением

$$m_{обм.акт} = \frac{60 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \times \frac{\gamma_{обм} \cdot P_{ном}}{u_{опт}^* \cdot B_{\delta} \cdot D_i \cdot n_{ном} \cdot k_{\phi} \cdot k_{обм} \cdot \alpha'} \quad (29)$$

Найденные из решения задачи оптимизации выражения (21)–(29) определяют уравнения взаимосвязи энергетических и конструктивных параметров СГПМ, работающего с максимально возможным КПД.

При их использовании на предварительной стадии проектирования необходимо правильно оценить потери в стали СГПМ.

При отсутствии мультипликатора в составе ВЭУ в связи с низкой частотой перемагничивания потери в стали малы, поэтому их влияние на эквивалентное активное сопротивление обмотки якоря в полученных выражениях можно не учитывать, однако при наличии мультипликатора в составе ВЭУ их влияние должно быть учтено введением поправочного коэффициента, увеличивающего активное сопротивление обмотки якоря, уточняемое на стадии поверочных расчетов численного расчета магнитного поля СГПМ с учетом электропроводности стали.

Для конструктивной схемы СГПМ с общим цилиндрическим магнитопроводом (рис. 3а) выражение удельной электрической мощности на выводах синхронного генератора запишем через две независимые переменные  $k_m$ ,  $n$  и расчетный диаметр  $D_i$  ротора

$$P_{эл.уг.} = \frac{\pi}{120p} \frac{m u_{опт} \mu_0 H_c J_{гоп} D_i n_{ном} k_m n}{\gamma_{обм} (1 + k_m)} \times \left[ \frac{(1 - F_{\delta}^*) k_{\phi} k_{обм} \alpha_{\delta}}{1 + \mu_0 \frac{H_c}{B_r} k_m n^2 \frac{\gamma_m}{\gamma_{обм} k_3}} \right] \quad (30)$$

где  $F_{\delta}^*$  — относительное значение намагничивающей силы обмотки якоря, приходящейся на одну пару полюсов, учитывающее явление реакции якоря;  $k_m = \frac{m_{обм.акт}}{m_m}$  — отношение массы активной части витков обмотки якоря к массе постоянных магнитов;  $n = \frac{d}{\delta_p}$  — отношение высоты постоянного магнита к эквивалентному воздушному зазору, учитывающему влияние пазов в сердечнике якоря на магнитное сопротивление зазора;  $p$  — число пар полюсов;  $k_3$  — коэффициент заполнения по меди;  $B_r$  и  $H_c$  — соответственно остаточная индукция и коэрцитивная сила постоянного магнита, например, для сплава NdFeB марки N40 остаточная индукция  $B_r = 1,1$  Тл, а коэрцитивная сила  $H_c = 955$  кА/м;  $\gamma_m = 7400$  кг/м<sup>3</sup> — плотность материала постоянного магнита;  $\gamma_{np} = 7400$  кг/м<sup>3</sup> — плотность медного обмоточного провода.

Отыскание в выражении (30) максимума удельной электрической мощности  $P_{эл.уг.макс}$  приравнянием нулю частных производных от функции двух независимых переменных

$$\frac{\partial P_{эл.уг.}}{\partial k_m} = 0, \quad \frac{\partial P_{эл.уг.}}{\partial n} = 0$$

позволяет найти критические точки

$$k_{m.опт.} = 1, \quad n_{опт.} = \sqrt{\frac{B_r}{\mu_0 H_c} \frac{\gamma_{обм}}{\gamma_m} k_3}. \quad (31)$$

После подстановки (31) в выражение (30) максимум удельной электрической мощности

$$P_{эл.уг.макс} = \frac{\pi \cdot u_{опт}^* \cdot D_i \cdot J_{гоп} \cdot n_{ном} \cdot \sigma_p \cdot k_{обм} \cdot k_{\phi}}{120} \times \sqrt{\frac{\mu_0 (BH)_{max} \cdot k_3}{\gamma_{обм} \cdot \gamma_m}}, \quad (32)$$

где  $(BH)_{max} = 318$  кДж/м<sup>3</sup> — магнитная энергия постоянного магнита для сплава NdFeB марки N40.

Полученные из решения задачи оптимизации уравнения использованы в методике и построении алгоритма предварительного расчета оптимальной конструкции СГПМ, реализованного в среде Borland Delphi 7.0. программном обеспечении [20].

В качестве примера ниже представлен расчет оптимальной конструкции синхронного генератора со следующими исходными данными: номинальная мощность  $P_{ном} = 5$  кВт, номинальное выходное напряжение  $U_{ном} = 130$  В, коэффициент мощности нагрузки  $\cos\phi = 1$ , число фаз  $m = 3$ , номинальная скорость вращения  $n = 120$  об/мин, число пазов статора  $z = 72$ , число пар полюсов  $p = 11$ . Конфигурация паза — прямоугольный открытый, тип обмотки — звезда, плотность тока в обмотке  $J = 4,4 \cdot 10^6$  А/м<sup>2</sup>, линейная токовая нагрузка  $A = 2,5 \cdot 10^4$  А/м, коэффициент заполнения  $k_3 = 0,4$ . Выбор числа пазов и полюсов постоянных магнитов производится на основе данных, представленных в [21]. Результатами расчета являются конструктивные и энергетические параметры тихоходного СГПМ, а именно диаметр ротора  $D_i = 0,382$  м, активная длина статора  $L' = 0,088$  м, номинальный ток при активной нагрузке  $I_{ном} = 12,8$  А, ЭДС холостого хода  $E_0 = 184$  В, частота  $f = 22$  Гц, ширина открытого паза  $b'_n = 0,011$  м, внешний диаметр статора  $D_a = 0,435$  м, высота паза  $h_n = 0,013$  м, число витков фазы, число проводников в пазу 65, масса активной части витков обмотки  $m_{обм} = 10,6$  кг, ширина полюса постоянного магнита  $b_m = 0,054$  м, высота полюса  $d = 0,013$  м, минимально возможные относительные потери  $P_{r.опт.} = 0,12$  о.е., потери в обмотке якоря,  $\Delta P_a = 530$  Вт.

Уточнение расчетов магнитной системы оптимальной конструкции тихоходного СГПМ и его энергетических параметров производится на стадии поверочных расчетов магнитного поля СГПМ с привлечением методов конечно-элементного анализа ELCUT 6.0 и ANSYS Maxwell 16.0.

На рис. 3б показана картина магнитного поля СГПМ без учета потерь в стали с использованием комплекса программ ELCUT 6.0.

На рис. 4 представлены результаты расчета внешней (а) и рабочей характеристики (б) оптимальной конструкции СГПМ при различных скоростях вращения ротора в пакете ANSYS Maxwell 16.0.

На рис. 5 приведена зависимость КПД СГПМ от тока нагрузки при скорости вращения ротора 120 об/мин.

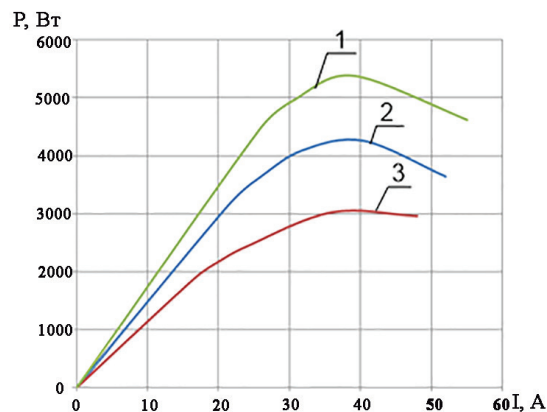
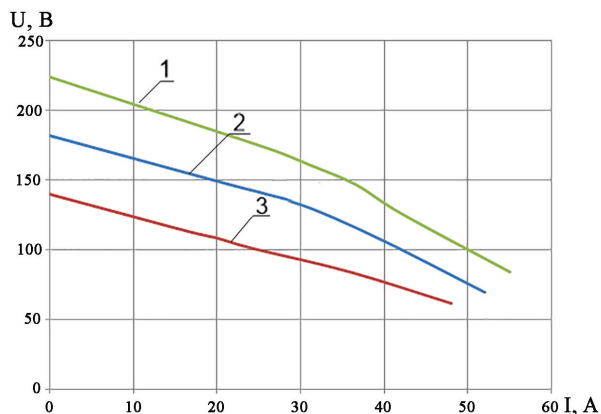


Рис. 4. Внешняя характеристика СГПМ (а) и зависимость выходной мощности от тока нагрузки при:  
1 —  $n = 120$  об/мин; 2 —  $n = 90$  об/мин; 3 —  $n = 70$  об/мин

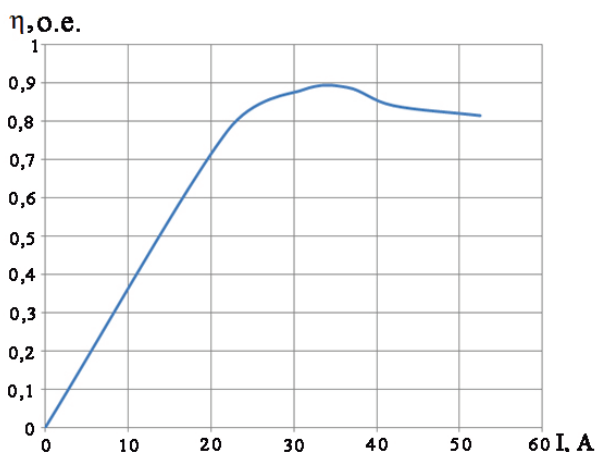


Рис. 5. Зависимость КПД от тока нагрузки СГПМ

Методика оптимизации параметров тихоходных СГПМ с учетом заданных технических условий на проектирование, устанавливающей взаимосвязь выходных параметров ВЭУ и конструктивных параметров магнитной системы синхронного генератора, и подтверждена результатами экспериментальных исследований макетного образца [22].

**Заключение.** В статье предложено решение задачи оптимизации параметров ВЭУ с тихоходными СГПМ, определяющее достижение максимально возможного КПД генератора.

В ходе решения задачи оптимизации определены уравнения взаимосвязи энергетических показателей ВЭУ с конструктивными параметрами тихоходных СГПМ. На основе решения задачи оптимизации параметров ВЭУ получены расчетные соотношения, позволяющие на стадии предварительных расчетов определить геометрические размеры магнитной системы и обмоточные данные СГПМ с цилиндрическим магнитопроводом в соответствии с техническим заданием.

#### Выводы.

1. Решение задачи оптимизации позволило разработать методику проектирования для модельного ряда мощностей синхронных генераторов ВЭУ до 30 кВт из условия обеспечения максимально возможного КПД СГПМ.

2. Методика расчета параметров СГПМ реализована в виде алгоритма и программы, позволяющей на стадии предварительных расчетов опре-

делить параметры магнитной системы генератора при условии обеспечения максимально возможного КПД в соответствии с условиями физической реализуемости опытного образца.

3. Для уточнения параметров магнитной системы и характеристик тихоходных СГПМ, определенных на стадии предварительных расчетов, целесообразно использовать на стадии поверочных расчетов конечно-элементный анализ магнитного поля оптимальных конструкций синхронных генераторов в программных пакетах ELCUT 6.0 и ANSYS Maxwell 16.0.

4. Установлено, что полученная в результате научного исследования конструктивная схема СГПМ с цилиндрическим магнитопроводом мощностью 5 кВт, скоростью вращения 130 об/мин и выходным напряжением 130 В обеспечивает в номинальном режиме максимум КПД 0,88 о.е.

#### Библиографический список

1. Беляков П. Ю. Производство электроэнергии на базе энергии ветра // Электротехнические комплексы и системы управления. 2008. № 1. С. 56–59.
2. Ismagilov F. R., Vavilov V. E., Bekuzin V. I., Ayguzina V. V. High-Speed Magneto-Electric Slotless Generator, Integrated into Auxiliary Power Unit: Design and Experimental Research of a Scaled-Size Prototype // International Review of Aerospace Engineering. 2016. Vol. 9 (5). P. 173–179. DOI: 10.15866/irease.v9i5.10432.
3. Ганджа С. А. Применение асинхронизированных синхронных генераторов для автономных и сетевых ветроэнергетических установок // Альтернативная энергетика и экология. 2010. № 1. С. 25–29.
4. Jian L., Chau K., Jiang J. A Magnetic-Geared Outer-Rotor Permanent-Magnet Brushless Machine for Wind Power Generation // IEEE Transactions on Industry Applications. 2009. Vol. 45, Issue 3. P. 954–962. DOI: 10.1109/TIA.2009.2018974.
5. Антипов В. Н., Данилевич Я. Б. Анализ и исследование соразмерного ряда синхронных машин как ветрогенераторов в диапазоне частот вращения 75-300 мин – 1 // Электротехника. 2009. № 1. С. 27–33.
6. Бубенчиков А. А., Бубенчикова Т. В., Шепелева Е. Ю. Анализ зарубежного опыта исследования систем генерации ветроэнергетических установок // Омский научный вестник. 2018. № 6 (162). С. 142–149. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-142-149.
7. Харитонов В. П. Автономные ветроэлектрические установки. Москва: ГНУ ВИЭСХ, 2006. 280 с.
8. Арнольд Р. Р. Расчет и проектирование магнитных систем с постоянными магнитами. Москва: Энергия, 1969. 184 с.

9. Шевченко А. Ф. Статическая устойчивость синхронных машин с постоянными магнитами // *Электричество*. 2007. № 1. С. 38–43.
10. Балагуров В. А., Галтеев Ф. Ф. Электрические генераторы с постоянными магнитами. Москва: Энергоатомиздат, 1988. 280 с. ISBN 5-283-00556-9.
11. Зарицкая Е. И., Канов Л. Н., Олейников А. М. Оптимизационный расчет тихоходного синхронного генератора на постоянных магнитах для безредукторных электрогенерирующих установок // *Проблемы техники*. 2013. Вип. 2. С. 17–23.
12. Исмагилов Ф. Р., Герасин А. А., Хайруллин И. Х., Вавилов В. Е. Электромеханические системы с высококоэрцитивными постоянными магнитами: моногр. Москва: Машиностроение, 2014. 267 с.
13. Корнеев В. В., Приступ А. Г. Проектирование синхронного генератора с постоянными магнитами // *Техническая наука — от теории к практике*. 2013. Т. 23. С. 106–113.
14. Шымчак П. Инновационные конструкции магнитных систем синхронных машин с постоянными магнитами // *Электричество*. 2009. № 9. С. 37–44.
15. Кошук Г. А., Никитин К. И., Татевосян А. С., Терещенко Н. А. Методика оптимизационного расчета конструкций подвесных электромагнитных сепараторов // *Омский научный вестник*. 2020. № 3 (171). С. 47–50. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-171-47-50.
16. Ряшенцев Н. П., Ковалев Ю. З. Динамика электромагнитных импульсных систем. Новосибирск: Наука, 1974. 186 с.
17. Татевосян А. А. Решение задачи оптимального управления магнитоэлектрического привода колебательного движения // *Омский научный вестник*. 2019. № 4 (166). С. 48–51. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-166-48-51.
18. Меркурьев Г. В., Шаргин Ю. М. Устойчивость энергосистем. Расчеты: моногр. Санкт-Петербург: НОУ Центр подготовки кадров энергетики, 2006. 300 с.
19. Бут Д. А. Бесконтактные электрические машины. Москва: Высшая шк., 1990. 416 с.
20. Татевосян А. А. Расчет оптимальных конструкций тихоходных синхронных магнитоэлектрических генераторов с общим цилиндрическим магнитопроводом в составе электротехнических комплексов по критерию максимума КПД: программа для ЭВМ. Москва: ФИПС, 2020. № 2020617967 от 15.07.2020.
21. Пат. № 2660945 РФ. МПК Н 02 К 3/12 (2017.08). Магнитоэлектрическая машина / Татевосян А. А., Корнев А. С. № 2016147632; заявл. 05.12.16; опубл. 05.06.18, Бюл. № 20.
22. Татевосян А. А., Татевосян А. С., Бельский А. А., Добуш В. С. Разработка стенда для испытания синхронных генераторов с постоянными магнитами // *Промышленная энергетика*. 2019. № 12. С. 57–62.

---

**ТАТЕВОСЯН Андрей Александрович**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электрическая техника», декан энергетического института.

SPIN-код: 6456-8370

AuthorID (РИНЦ): 163175

AuthorID (SCOPUS): 56503745000

ResearcherID: M-3175-2015

Адрес для переписки: karo1@mail.ru

#### Для цитирования

Татевосян А. А. Научные основы проектирования оптимальных конструкций тихоходных синхронных генераторов с постоянными магнитами для ветроэнергетических установок // *Омский научный вестник*. 2021. № 1 (175). С. 32–38. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-175-32-38.

**Статья поступила в редакцию 28.12.2020 г.**

© А. А. Татевосян