

Оптимизация тихоходного синхронного генератора модульного типа и принцип реализации системы управления напряжением генератора на основе нейронной сети

ТАТЕВОСЯН А.А.
ОмГТУ, Омск, Россия

Предложены методика оптимизации параметров тихоходного синхронного генератора с постоянными магнитами (СГПМ) модульного типа и система управления выходного напряжения генератора, построенная на реализации алгоритма с использованием нейронной сети. Рассмотрена базовая конструктивная схема тихоходного СГПМ модульного типа, особенностью которой является компактность размещения его основных частей, допускающая целесообразность использования рабочего объема, уменьшение размеров магнитной системы и массы используемых при изготовлении активных материалов. Простота и надежность конструкции генератора позволяет в зависимости от условий эксплуатации широко варьировать его выходные параметры, используя типовые электрические схемы для стабилизации напряжения и выпрямления тока, а также дополнительно блок регулятора напряжений. Это обстоятельство выгодно отличает конструктивную схему рассматриваемого генератора от существующих аналогов с общим цилиндрическим магнитопроводом. Поэтому разработки по созданию высокоэффективного тихоходного синхронного генератора с постоянными магнитами модульного типа в качестве автономного источника питания постоянного тока имеют как научный, так и практический интерес, охватывая большой круг потребителей электрической энергии, расположенных в сельской местности, районах малоэтажной застройки, военных городках, приусадебных хозяйствах и др. При решении задачи оптимизации магнитной системы синхронного генератора получено основное расчетное уравнение электрической машины и определены оптимальные отношения массы обмоточного провода к массе постоянных магнитов, высоты постоянных магнитов к величине воздушного зазора, доставляющие максимум удельной полезной мощности. Установлена аналитическая взаимосвязь конструктивных параметров оптимальной конструкции тихоходного СГПМ модульного типа с энергетическими параметрами его работы. Показана целесообразность разработки системы управления, построенной на использовании нейронной сети. Определено количество работающих на нагрузку модулей генератора в зависимости от скорости ветра, коэффициента загрузки и требуемого выходного напряжения. Обучение нейронной сети проводилось на примерах обучающей выборки с использованием лабораторного испытательного стенда. Реализация нейронной сети выполнена в среде MatLab 2019b построением имитационной модели синхронного генератора в программном расширении Simulink. Показана возможность использования системы управления напряжением тихоходного СГПМ модульного типа микроконтроллером для работы HC платформы семейства Arduino (Arduino Due) независимо от ПК.

К л ю ч е в ы е с л о в а: конструктивная схема, оптимизация магнитной системы, тихоходный синхронный генератор модульного типа, система управления напряжением на выходе генератора

Расчет оптимальных конструкций и исследование рабочих процессов тихоходных синхронных генераторов с постоянными магнитами (СГПМ) модульного типа имеют целью создание высокоэффективных автономных источников постоянного тока в составе электрогенерирующих комплексов различного назначения. Многолетний опыт, связанный с проектированием и созданием новых и модернизацией существующих типов синхронных магнитоэлектрических машин, обладающих принципом обратимости работы в режимах генератора и двигателя, не исчерпывает глубину решаемых задач вследствие их сложности и трудоем-

кости [1–8]. К числу таких задач относятся оптимизационные расчеты конструкций тихоходных СГПМ, в которых специфические особенности рабочего процесса обуславливают ограничения по габаритам и массе активных материалов, приходящихся на единицу установленной мощности. Возможность перехода от известных аналогов конструктивных схем магнитных систем СГПМ с общим цилиндрическим магнитопроводом к конструкциям СГПМ модульного типа (с независимыми сердечниками) связана с обоснованными рисками разработчиков в необходимости увеличения воздушного зазора между статором и ротором, а так-

же роста массогабаритных показателей. Преодоление трудностей на этом пути связано с поиском новых конструктивных решений магнитных систем СГПМ модульного типа.

Решение задачи оптимизации параметров тихоходного СГПМ модульного типа рассмотрено на конструктивной схеме магнитной системы, предложенной в работах [10,11]. Конструкция синхронного генератора состоит из одной или нескольких идентичных секций (рис. 1), каждая из которых включает подвижную часть (ротор-индуктор) и неподвижную (статор-якорь).

Количество идентичных секций зависит от мощности источника механической энергии и выходных параметров синхронного генератора. На роторе, образующем два ряда полюсов с продольно-поперечно чередующейся полярностью, расположено с одинаковым шагом четное количество постоянных магнитов (ПМ). Постоянные магниты изготавливаются из редкоземельного сплава неодим-железо-бор (NdFeB) с высокими значениями остаточной магнитной индукции B_r и коэрцитивной силы H_c . На статоре попарно напротив друг друга закреплено четное количество подковообразных электромагнитов (ЭМ), называемых модулями. Сердечники ЭМ шихтованы и изготавливаются из изолированных листов электротехнической стали. Обмотка ЭМ состоит из двух последовательно встречно соединенных катушек, которые подключены к полупроводниковому выпрямителю. Для уменьшения пускового момента при страгивании ротора генератора число ЭМ, равное N , и число ПМ в одном ряду, равное $2p$, удовлетворяют одному из соотношений:

$$N \geq 2p + 2 \quad \text{при } p = 3 + k, \quad k = 0, 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

или

$$N \leq 2p - 2 \quad \text{при } p = 5 + 2k, \quad k = 0, 1, 2, 3, \dots, n. \quad (2)$$

Различия в записи соотношений (1) и (2) связаны с рекомендациями по выбору большего или меньшего числа ЭМ по сравнению с числом ПМ, причем в каждом из них выполняется условие $|N - 2p| \geq 2$. На выбор числа ПМ и ЭМ оказывает влияние форма полюсов ПМ и сердечников ЭМ. Для усиления ЭДС в обмотке ЭМ противоположные полюса ПМ, расположенные один под другим на подвижном роторе, замкнуты ферромагнитными пластинами.

Наличие независимых сердечников в конструкции синхронного генератора делает каждый модуль статора самостоятельным источником индуктированной ЭДС. Установка дополнительного блока регулятора напряжений позволяет включать/отключать отдельные модули или их комбинации, варьируя тем самым напряжение и ток в нагрузке или нескольких нагрузках одновременно в зависимости от вращающего момента на валу приводного двигателя.

Для демонстрации преимуществ конструктивной схемы тихоходного СГПМ модульного типа показан пример разработки адаптивной нейронной системы, используемой в качестве блока регулятора напряжений для функционирования ветроэнергетической установки (ВЭУ). Разработка системы управления на основе нейронной сети (НС) обеспечивает непрерывную внутреннюю корректировку напряжения синхронного генератора с учетом оценки изменения параметров ВЭУ при длительной эксплуатации. При обучении нейронной сети использованы экспериментальные данные, полученные на испытательном стенде.

Оптимизация параметров тихоходного СГПМ модульного типа. Повышение эффективности и надежности электрогенерирующих комплексов путем исключения мультипликатора (механического звена) для преобразования и передачи крутящего момента на вал тихоходных СГПМ обуславливает специфические особенности рабочего процесса, а также отражается в жесткости требований, предъявляемых к проектиро-

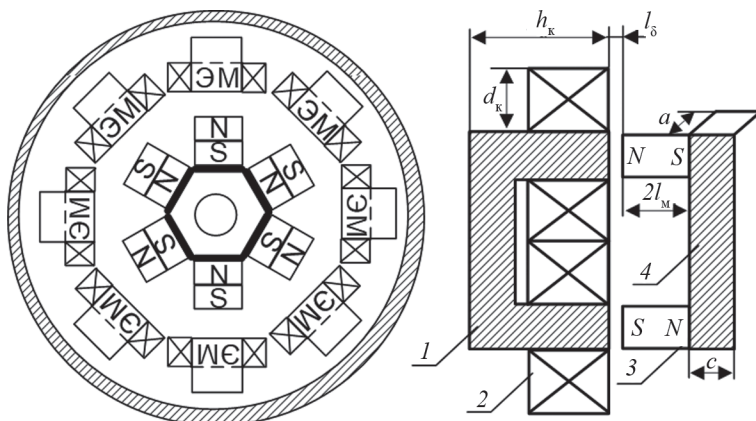


Рис. 1. Конструктивная схема магнитной системы тихоходного СГПМ модульного типа: 1 – подковообразный электромагнит; 2 – обмотка; 3 – постоянные магниты; 4 – ферромагнитная пластина; 5 – алюминиевый корпус

Fig. 1. Magnetic system design diagram of a low-speed synchronous generator with permanent magnets (PMSG) of the modular type: 1 – electromagnet; 2 – winding; 3 – permanent magnets; 4 – ferromagnetic plate; 5 – aluminum case

ванию оптимальных конструкций тихоходных СГПМ при работе на низких частотах вращения ротора. Применительно к безредукторным ВЭУ эти требования сводятся к предельному упрощению конструкций тихоходных СГПМ, имеющих максимальную прочность и надежность, повышенную эффективность охлаждения и простоту обслуживания [9]. Целесообразно считать, что этим требованиям соответствует конструктивная схема тихоходного СГПМ модульного типа.

Для универсальности методики оптимизационного расчета с любым количеством идентичных секций синхронного генератора в его составе при выводе расчетных соотношений ограничимся рассмотрением одной идентичной секции. Для оптимального проектирования синхронного генератора будем использовать общепринятый набор исходных данных, к которым относятся номинальная мощность $P_{\text{ном}}$, номинальное напряжение $U_{\text{ном}}$, коэффициент мощности $\cos\varphi$, число пар полюсов p или число ЭМ N , частота f . В качестве варьируемых параметров для тихоходных СГПМ используем предварительные значения линейной нагрузки $2 \div 3 \cdot 10^4$ А/м, плотности тока в обмотке якоря $(4 \div 6) \cdot 10^6$ А/м² и магнитной индукции в зазоре $(0,5 \div 0,6)B_s$.

Главными размерами магнитной системы тихоходного СГПМ модульного типа являются диаметр якоря по окружности воздушного зазора D_a и его длина l_a . Их определение связано с выводом основного уравнения электрической машины:

$$D_a = \sqrt[3]{\frac{C_A S_{\text{ном}} N \sin \frac{\pi}{N}}{8u^* n \lambda k_d k_a k_p}}, \quad (3)$$

где $C_A = 60/(\pi^2 B_s A \alpha_s k_\phi)$ – постоянная Арнольда; $S_{\text{ном}} = P_{\text{ном}}/\cos\varphi$ – полная мощность; B_s – магнитная индукция в воздушном зазоре; A – линейная нагрузка; $\alpha_s < 1$ – коэффициент полюсного перекрытия, равный отношению меньшего к большему числу (ПМ/ЭМ); $k_\phi = 1,11$ – коэффициент формы; $u^* = U_{\text{ном}}/E_0 = 0,7 \div 0,8$ – относительное напряжение на нагрузке; $n = 60fp$ – частота вращения ротора; p – число пар полюсов; $\lambda = l_a/D_a = 0,5-0,8$ – геометрический фактор; $k_d = 0,7-0,8$ – расчетный коэффициент, учитывающий реакцию якоря; $k_a = 0,65-0,75$ – коэффициент, равный отношению расчетной полюсной дуги к полюсному делению $\tau = \pi D_a/2p$.

Расчетная мощность тихоходного СГПМ модульного типа:

$$S_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\cos\varphi} = U_{\text{ном}} I_{\text{ном}} = u^* E_0 I_{\text{ном}} = k_u E_0 I_k, \quad (4)$$

где

$$k_u = u^* \left[-\frac{u^* (\cos\varphi + Q_d \sin\varphi)}{\sqrt{1+Q_d^2}} + \sqrt{1 - \frac{u^{*2} (\sin\varphi - Q_d \cos\varphi)}{1+Q_d^2}} \right]$$

– коэффициент использования; $I_k = \frac{E_0}{\sqrt{R_a^2 + X_a^2}}$ – ток

короткого замыкания; $Q_d = X_a/R_a$ – добротность обмотки якоря; R_a – активное сопротивление обмотки якоря, учитывающее потери в обмотке и стали; X_a – индуктивное сопротивление обмотки якоря с учетом потока реакции якоря.

ЭДС обмотки ЭМ:

$$E_{\text{эм}} = 4k_\phi \alpha_s B_s S_\delta f w_{\text{эм}}, \quad (5)$$

где $w_{\text{эм}}$ – число витков обмотки ЭМ; $S_\delta = \tau l_a k_a k_p$ – площадь воздушного зазора; k_p – расчетный коэффициент, зависящий от формы постоянного магнита и направления намагничивания.

Вывод расчетных соотношений параметров СГПМ рассмотрим на примере конструкции индуктора с ПМ, изготовленными в форме диска, имеющими аксиальное направление намагничивания. Круглая форма полюса позволяет более качественно выбрать опытные образцы ПМ с одинаковой объемной намагниченностью, упростив технологию изготовления индуктора, и уменьшить радиальные биения вала [10].

На основе полученного аналитического решения индуктированной ЭДС в витке, находящемся в магнитном поле ПМ, совершающем круговое движение, соотношение (5) можно конкретизировать [13]:

$$E_{\text{эм}} = \sqrt{2} B_s R \frac{\pi D_a n}{60} \alpha_s w_{\text{эм}}, \quad (6)$$

где R – радиус ПМ.

При равенстве выражений (5) и (6) получим:

$$S_\delta = \frac{R}{\sqrt{2} k_\phi} \left(\frac{\pi D_a}{2p} \right) = \frac{1}{\sqrt{2} k_\phi} \left(\frac{k_a D_a \sin \frac{\pi}{2p}}{2} \right) \left(\frac{\pi D_a}{2p} \right) = \tau l_a k_a k_p. \quad (7)$$

Принимая в (7) значение $k_\phi = \pi/2\sqrt{2} = 1,11$, найдём:

$$k_p = \frac{\sin(\pi/2p)}{\pi \lambda}. \quad (8)$$

ЭДС обмотки якоря в режиме холостого хода:

$$E_0 = \frac{2E_{\text{эм}}}{\sin(\pi/N)}. \quad (9)$$

Намагничивающая сила обмотки ЭМ:

$$I_{\text{ном}} w_{\text{эм}} = \frac{\pi D_a A k_a k_d}{N}. \quad (10)$$

С учетом соотношений (4), (6) и (8) выражение полной мощности тихоходного СГПМ модульного типа преобразуется к виду:

$$S_{\text{НОМ}} = \frac{u^* 2\sqrt{2} B_{\delta} R \frac{\pi D_a n}{60} \alpha_{\delta} w_{\text{ЭМ}} I_{\text{НОМ}}}{\sin\left(\frac{\pi}{N}\right)}. \quad (11)$$

При определении магнитной индукции B_m в нейтральном сечении постоянного магнита S_m примем $B_m S_m = B_{\delta} S_{\delta}$, тогда из расчета магнитной цепи СГПМ

$$B_{\delta} = \frac{B_m S_m}{S_{\delta}} = B_r \frac{\lambda_{\delta}^* S_m}{1 + \lambda_{\delta}^* S_{\delta}}, \quad (12)$$

где $\lambda_{\delta} = \mu_0 \frac{S_{\delta}}{\delta}$, $\lambda_m = \frac{B_r S_m}{H_c d}$ – соответственно магнитные проводимости воздушного зазора и ПМ, приходящиеся на один полюс; δ – воздушный зазор; d – высота ПМ.

Намагничивающую силу обмотки ЭМ с учетом реакции якоря выразим через допустимую плотность тока J_d , площадь поперечного сечения катушки $S_{\text{кат}}$ и коэффициент заполнения k_3 :

$$I w_{\text{ЭМ}} = 2 J_d S_{\text{кат}} k_3 k_d. \quad (13)$$

После подстановки соотношений (12) и (13) в (11) получим выражение полной мощности тихоходного СГПМ модульного типа в зависимости от расчетного радиуса ПМ:

$$S_{\text{НОМ}} = u^* 4\sqrt{2} \frac{\mu_0 H_c R S_{\text{кат}} J_d \alpha_{\delta} k_3 k_d}{\left(1 + \mu_0 \frac{H_c S_{\delta}}{B_r S_m} \frac{d}{\delta}\right) \sin\left(\frac{\pi}{N}\right)} \left(\frac{\pi D_a n}{60}\right) \left(\frac{d}{\delta}\right). \quad (14)$$

Геометрические размеры ПМ и другие оптимальные параметры магнитной системы определим исходя из условий достижения максимума удельной полной мощности:

$$S_{\text{НОМ.уд}} = u^* 4\sqrt{2} \times \frac{\mu_0 H_c R S_{\text{кат}} J_d \alpha_{\delta} k_3 k_d}{\left(1 + \mu_0 \frac{H_c S_{\delta}}{B_r S_m} \frac{d}{\delta}\right) \sin\left(\frac{\pi}{N}\right) (1 + k_m) m_m} \left(\frac{\pi D_a n}{60}\right) \left(\frac{d}{\delta}\right), \quad (15)$$

где $k_m = m_{\text{обм}}/m_m$ – отношение массы обмоточного провода к массе ПМ; $m_{\text{обм}} = 2NS_{\text{кат}} l_{\text{ср}} k_3 \gamma_{\text{обм}}$; $m_m = 4pdS_m \gamma_m$; $l_{\text{ср}}$ – средняя длина витка; $\gamma_{\text{обм}}$ – плотность меди; γ_m – плотность материала постоянного магнита.

Для этого преобразуем выражение (15), представив его в виде функционала с двумя независимыми переменными $k_m = m_{\text{обм}}/m_m$ и $k_{\chi} = d/\delta$:

$$S_{\text{НОМ.уд}} = \frac{A_1 k_m k_{\chi}}{(1 + A_2 k_m k_{\chi}^2)(1 + k_m)} = A_1 F(k_m, k_{\chi}), \quad (16)$$

где A_1 и A_2 – постоянные коэффициенты:

$$A_1 = u^* \frac{\sqrt{2}\pi}{30} \mu_0 H_c \frac{R J_d D_a n}{N \sin\left(\frac{\pi}{N}\right)} \frac{\alpha_{\delta} k_d}{\gamma_{\text{обм}} l_{\text{ср}}};$$

$$A_2 = \mu_0 \frac{H_c}{B_r} \frac{2p}{N} \frac{1}{k_3} \frac{\gamma_m}{\gamma_{\text{обм}}} k_l.$$

При выводе функционала (16) поправочный расчетный коэффициент, учитывающий соотношение объемов обмотки якоря и воздушного зазора $k_l = S_{\delta} \delta / S_{\text{кат}} l_{\text{ср}}$, находится методом последовательных приближений. В начале итерационного процесса значение $k_l = 1$.

Для отыскания экстремума функционала приравняем нулю его частные производные и решим систему уравнений для определения неизвестных:

$$\frac{\partial S_{\text{НОМ.уд}}}{\partial k_{\chi}} = 0 \quad \text{и} \quad \frac{\partial S_{\text{НОМ.уд}}}{\partial k_m} = 0. \quad (17)$$

При записи корней системы можно убедиться, что система уравнений в положительной полуплоскости пространства определена и имеет единственное решение (рис. 2):

$$k_{\chi \text{ опт}} = \frac{d}{\delta} = \sqrt{\frac{1}{A_2}} = \sqrt{\frac{B_r}{\mu_0 H_c} \frac{N}{2p} \frac{\gamma_{\text{обм}}}{\gamma_m} \frac{k_3}{k_l}}; \quad (18)$$

$$k_{m \text{ опт}} = \frac{m_{\text{обм}}}{m_m} = 1.$$

Подставляя корни системы $k_{\chi \text{ опт}}$ и $k_{m \text{ опт}}$ в функционал (16), получим выражение максимума удельной полной мощности тихоходного СГПМ модульного типа:

$$S_{\text{НОМ.уд. макс}} = \sqrt{2} u^* \left(\frac{\pi D_a n}{60}\right) \times \frac{R J_d}{N \sin\left(\frac{\pi}{N}\right)} \frac{\alpha_{\delta} k_d}{l_{\text{ср}}} \sqrt{\frac{\mu_0 (HB)_{\text{макс}}}{\gamma_m \gamma_{\text{обм}}} \frac{N}{2p} \frac{k_3}{k_l}}, \quad (19)$$

где $(HB)_{\text{макс}}$ – максимальное энергетическое произведение.

Входящая в выражение (19) величина средней длины витка катушки ЭМ $l_{\text{ср}} \approx 2\pi(R + 0,5b_k)$ определяется методом последовательных приближений. При этом оптимальное соотношение размеров сечения катушки высотой h_k и шириной b_k можно определить из условия минимума массы активных материалов ЭМ:

$$n_{\text{опт}} = \frac{h_k}{b_k} = 4 \frac{S_{\text{кат}} k_3 \gamma_{\text{обм}}}{S_c k_c \gamma_c}, \quad (20)$$

где S_c – площадь сечения полюса ЭМ; γ_c – плотность стали; k_c – коэффициент заполнения стали.

Проведем исследование функционала на максимум удельной мощности для представленной конструктивной схемы СГПМ модульного типа:

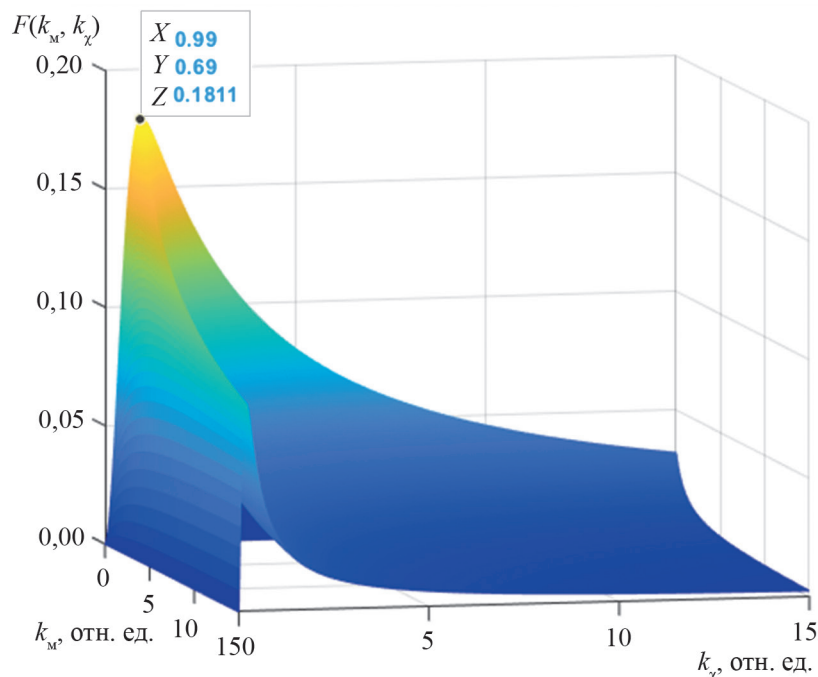


Рис. 2. Нахождение максимума функционала $F(k_\chi, k_m) \equiv S_{ном,уд}$ путем перебора значений переменных

Fig. 2. Determining Maximum of the functional $F(k_\chi, k_m) \equiv S_{ном,уд}$ by enumerating the values of variable

$$n_{опт} = \frac{h_k}{b_k} = 4 \frac{S_{кат} k_3 \gamma_{обм}}{S_c k_c \gamma_c} \tag{21}$$

Решение задачи оптимизации по максимуму удельной мощности определяет соотношения $k_{м\ опт} = 1$ и $k_\chi = 0,7$.

Соотношения (1) – (20) положены в основу оптимизационного расчета магнитной системы тихоходного СГПМ модульного типа, которая на предварительной стадии заключается в определении основных размеров магнитной системы на основе аналитического расчета магнитной цепи с введением поправочных коэффициентов учета магнитного потока рассеяния на роторе, реакции якоря и др. На стадии поверочных расчетов на основе построенной математической модели СГПМ модульного типа в пакете *ANSYS Maxwell 16.0* уточняются значения плотности тока в сечении катушек ЭМ, линейная нагрузка, истинная конфигурация магнитной системы и обмоточные данные, тепловые потери (сталь, медь) в элементах конструкции синхронного генератора.

В табл. 1 приведены результаты расчета СГПМ модульного типа.

Конструкция магнитной системы и внешний вид экспериментального макетного образца СГПМ модульного типа [11] и его параметры представлены на рис. 3.

В программном комплексе *ANSYS Maxwell 16.0* разработана имитационная модель СГПМ. Верификация модели проводилась следующими способами: в статическом режиме – сопоставлением результатов экспериментальных измерений значений индукции магнитного поля и расчетных значений индукции (рис. 4); в динамическом режиме – сравнением выходного напряжения на обмотке якоря СГПМ при различных сопротивлениях нагрузки и разной скорости вращения индуктора [12].

Экспериментальное исследование магнитного поля проводилось при помощи щупа миллитесламетра ТПУ в воздушном зазоре в области электромагнита (на границе и середине полюса), а также в пространстве между ними. Среднеквадратичное отклонение по

Таблица 1

Результаты расчета параметров СГПМ
Results of calculating the parameters of the PMSM

Исходные данные СГПМ: P, кВт / n, об/мин / U, В	cosφ	2p	D _a /D _p , м/м	L _p , м	δ, мм	A·10 ⁴ , А/м	w _{эм}	η, %
5/400/220	0,9	22	0,80/0,87	0,23	4	2	72	91
3/400/220	0,9	22	0,67/0,74	0,42	4	2	101	88
0,5/400/220	0,9	6	0,34/0,28	0,17	10	2	620	80

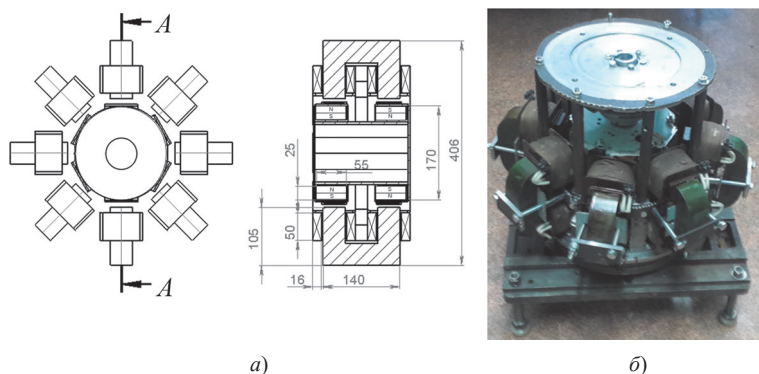


Рис. 3. Конструкция магнитной системы (а) и макетный образец (б) СГПМ модульного тип

Fig. 3. The construction of the magnetic system (a) and the prototype (b) PMSG

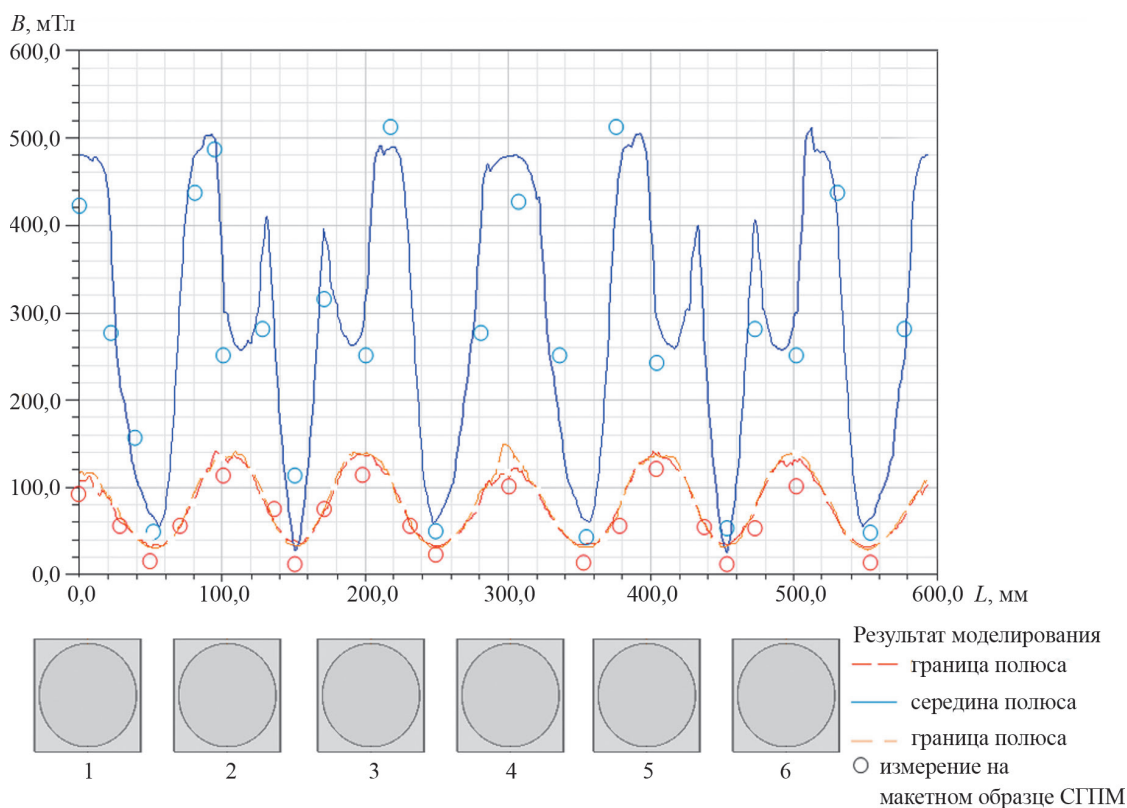


Рис. 4. Исследование магнитного поля на развертке магнитной системы синхронного генератора

Fig. 4. Study of the magnetic field on a sweep of the synchronous generator magnetic system

сопоставлению результатов натуральных измерений и полученных в имитационной модели не превышает 5%.

Реализация системы управления напряжением генератора на основе нейронной сети. Учитывая, что СГПМ модульного типа может функционировать при различном количестве и схемах подключения катушек электромагнитов, а выходное напряжение близко к синусоидальной форме, одним из вариантов решения задачи ввода/вывода из электрической цепи ЭМ является использование в системе управления СГПМ алгоритмов искусственного интеллекта – нейронной сети (НС).

Используя полученную математическую модель *ANSYS Maxwell 16.0*, а также результаты экспериментальных исследований, можно построить зависимость выходного напряжения от коэффициента загрузки и скорости вращения ротора генератора.

Структура системы управления СГПМ модульного типа представлена на рис. 5.

Особенностью НС является возможность обучения, что позволяет корректировать весовые коэффициенты НС на основе статистических данных о фактическом режиме работы в процессе эксплуатации ВЭУ. После выполнения процедуры обучения MatLab предоставля-

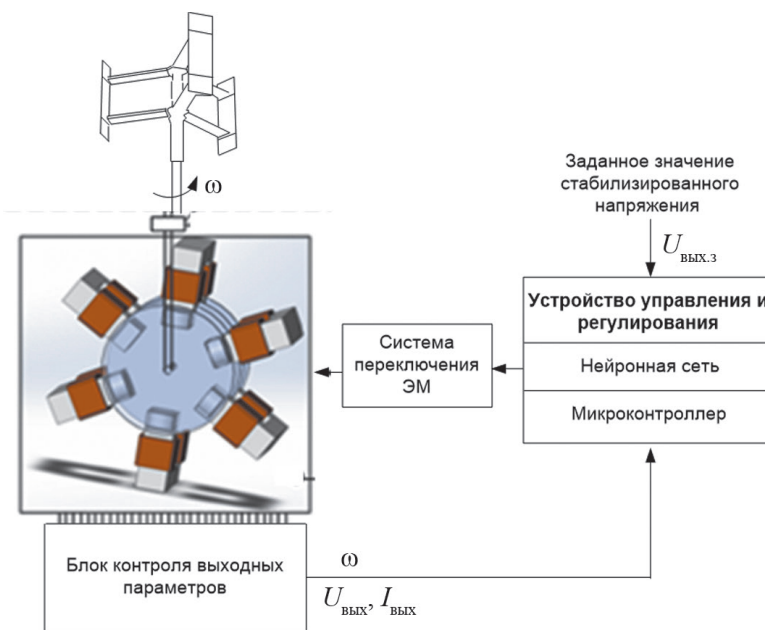


Рис. 5. Структура системы управления СГПМ модульного типа

Fig. 5. Structure of the PMSG control system

ет сводную информацию о его качестве: регрессионный анализ и гистограмму ошибок.

Структура данных для входного слоя НС может быть представлена табл. 2.

Особенностью НС является возможность обучения, что позволяет корректировать весовые коэффициенты НС на основе статистических данных о фактическом режиме работы в процессе эксплуатации ВЭУ. После выполнения процедуры обучения MatLab предоставляет сводную информацию о его качестве: регрессионный анализ и гистограмму ошибок.

Структура данных для входного слоя НС дана в табл. 2.

Обучение НС выполняется в расширении MatLab Deep Learning Space при помощи модуля Neural Network

Start (nnstart). Используется двухслойная структура НС, количество нейронов в скрытом слое равно 30.

Экспериментально установлено, что для рассматриваемой конструкции СГПМ модульного типа при скорости вращения индуктора 400 об/мин выходное напряжение в 220 В достигается включением четырех электромагнитов, а при понижении скорости вращения необходимо последовательно соединить восемь ЭМ (четыре пары включены встречно и последовательно). При понижении скорости вращения вала уменьшается ЭДС в витках катушки, и результирующее значение выходного напряжения должно быть скорректировано НС.

Система управления, основанная на НС, может быть реализована на микроконтроллерах различного

Таблица 2

Данные для обучения НС для СГПМ в режиме холостого хода
The train data for the Neural Network for the PMSG in idle mode

ЭМ	$U_{\text{вых}}, \text{В}$	$n, \text{об/мин}$	ЭМ	$U_{\text{вых}}, \text{В}$	$n, \text{об/мин}$	ЭМ	$U_{\text{вых}}, \text{В}$	$n, \text{об/мин}$	ЭМ	$U_{\text{вых}}, \text{В}$	$n, \text{об/мин}$
2	28,94	100	4	52,34	100	6	68,23	100	8	75,49	100
2	35,18	120	4	62,95	120	6	81,79	120	8	91,17	120
2	41,14	140	4	73,49	140	6	95,39	140	8	106,52	140
2	46,88	160	4	83,98	160	6	109,02	160	8	121,58	160
2	52,43	180	4	94,42	180	6	122,66	180	8	136,39	180
2	57,87	200	4	104,82	200	6	136,31	200	8	150,99	200
2	63,24	220	4	115,20	220	6	149,96	220	8	165,42	220
2	68,60	240	4	125,58	240	6	163,58	240	8	179,71	240
2	73,99	260	4	135,95	260	6	177,18	260	8	193,89	260
2	79,48	280	4	146,33	280	6	190,74	280	8	208,02	280
2	85,11	300	4	156,74	300	6	204,26	300	8	222,13	300

исполнения. В работе для проведения исследования использовалась платформа семейства *Arduino* (*Arduino Due*), обладающая низкой стоимостью и вместе с тем представляющая собой новую архитектуру, построенную на 32-битном микроконтроллере *Atmel SAM 3X8Ec ARM* с процессором на базе ядра *ARM Cortex-M3*. На платформе предусмотрены цифровые входы/выходы, связь по *USB*. Кроме этого, указанный микроконтроллер совместим с системой *MatLab*, в которой создана и обучена НС [15,16].

Система управления посредством интерфейса *MatLab* загружается в *Arduino Due*, причем возможны два режима работы: в среде *MatLab* (при непосредственном подключении контроллера к персональному компьютеру) и независимо от нее. Первый режим, как правило, используется в лабораторных условиях для проверки логики срабатывания силовых ключей системы управления. После выполнения отладочных работ модель *Simulink* загружается в микроконтроллер, который используется независимо от среды *MatLab* (независимо от персонального компьютера).

Для разработанного макетного образца СГПМ переключение силовых контакторов организовано с помощью твердотельных реле серии *DA (FotekSSR-25 DA)* [14], которые обладают высоким быстродействием и низким временем переключения.

Текущие значения скорости вращения ротора, тока и напряжения поступают на аналоговые входы *Arduino Due* на соответствующие входы (*Pin*) платформы. По значениям тока и напряжения рассчитывается коэффициент загрузки генератора, значение которого совместно со значениями скорости вращения ротора и требуемого выходного напряжения поступает на вход НС. На выходе НС предоставляет информацию о количестве необходимых электромагнитов, которые должны быть активны для питания потребителя. Для макетного образца это значение соответствует 1, 2, 3 или 4 парам электромагнитов. В зависимости от принятого решения на соответствующих выходных портах *Arduino Due* формируется логическая 1, что соответствует уровню напряжения 3,3 В. Указанное напряжение подается на управляющие контакты твердотельных реле, которые работают в ключевом режиме и осуществляют переключение силовых контакторов, к которым присоединены катушки электромагнитов.

При разработке и исследовании СГПМ модульного типа можно отметить ряд преимуществ: выходное напряжение имеет низкий коэффициент несинусоидальности (менее 1%), высокая технологичность сборки, модульность ремонта и замены элементов магнитной системы, гибкость управления и возможность быстрого расширения диапазона использования за счет изменения количества модулей. На основе решения задачи оптимизации для данного типа генераторов определены аналитические выражения, устанавливающие взаи-

мосвязь его конструктивных параметров с выходными энергетическими показателями.

Выводы. Предложены аналитические выражения, устанавливающие взаимосвязь конструктивных и энергетических параметров СГПМ модульного типа. Верификация полученных в ходе исследования выражений проводилась путем сопоставления результатов расчета на действующем экспериментальном макетном образце СГПМ модульного типа.

Предложен подход к разработке системы управления СГПМ модульного типа, позволяющий осуществлять переключение обмоток электромагнитов в зависимости от скорости ветра, коэффициента загрузки и требуемого выходного напряжения, основанный на применении нейронной сети. Показана возможность создания нейронной сети в программном комплексе *MatLab*, ее использования в имитационной модели *Simulink* и загрузки в платформу *Arduino Due* в системе управления СГПМ модульного типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арнольд Р.Р. Расчет и проектирование магнитных систем с постоянными магнитами. М.: Энергия, 1969, 184 с.
2. Балагуров В.А., Галтеев Ф.Ф. Электрические машины с постоянными магнитами. М.: Энергоатомиздат, 1988, 280 с.
3. Бут Д.А. Бесконтактные электрические машины. М.: Высшая школа, 1990, 416 с.
4. Исмагилов Ф.Р., Герасин А.А., Хайруллин И.Х., Вавилов В.Е. Электромеханические системы с высококоэффициентными постоянными магнитами. М.: Машиностроение, 2014, 267 с.
5. Кривцов В.С., Олейников А.М., Яковлев А.И. Неисчерпаемая энергия. Кн.1. Ветроэлектрогенераторы. Харьков: ХАИ, 2003, 400 с.
6. Кривцов В.С., Олейников А.М., Яковлев А.И. Неисчерпаемая энергия. Кн.2. Ветроэнергетика. Харьков: ХАИ, 2004, 519 с.
7. Смирнов А.Ю. Проектирование высокооборотных генераторов большой мощности с постоянными магнитами на роторе. – Электричество, 2017, № 11, с. 40–45.
8. Зубков Ю.В., Владимиров Д.А. Проектирование генератора с магнитоэлектрическим возбуждением электростанции собственных нужд. – Электричество, 2020, № 6, с. 24–30.
9. Олейников А.М., Канов Л.Н., Зарицкая Е.И. Инженерная методика оптимизационного расчета тихоходного синхронного генератора с постоянными магнитами. – Вестник СевГТУ: Механика. Энергетика. Экология, 2008, с. 104–107.
10. Патент РФ № 2303849, МПК H02K 21/18. Бесколлекторный синхронный генератор с постоянными магнитами / В.В. Шкондин, опубл. 27.07.07, Бюл. № 28.
11. Патент РФ № 2693011, МПК H02K 21/14 (2006.01). Бесколлекторный синхронный генератор модульного типа с постоянными магнитами / А.А. Татевосян, опубл. 01.07.2019, Бюл. №19.
12. Татевосян А.А. Исследование влияния конструктивных параметров тихоходных синхронных генераторов с постоянными магнитами в составе электротехнических комплексов на их энергетические характеристики. – Электротехнические и информационные комплексы и системы, 2019, т. 15, № 2, с.15–25.
13. Татевосян А.А., Огорелков Б.И., Татевосян А.С. Расчет индуктированной ЭДС в витке при относительном движении постоянного магнита с различной формой поперечного сечения. – Омский научный вестник, 2014, № 3 (133), с. 179–183.

14. **Твердотельные реле серии SSR, TSR.** Руководство пользователя [Электрон. ресурс] URL: http://www.fotek.com.ua/webfm_send/148 (дата обращения 17.05.2021).

15. **Arduino Support from MATLAB** [Электрон. ресурс] URL: <http://www.mathworks.com/hardware-support/arduino-matlab.html> (дата обращения 17.05.2021).

16. **Arduino Support from Simulink** [Электрон. ресурс] URL: <https://www.mathworks.com/help/supportpkg/arduino/index.html> (дата обращения 17.05.2021).

[25.01.2021]



Автор: **Татевосян Андрей Александрович** – кандидат техн. наук, доцент кафедры «Электрическая техника» Омского государственного технического университета.

Elektrichestvo, 2021, No. 7, pp. 61–70

DOI:10.24160/0013-5380-2021-7-61-70

Optimizing a Modular Half-Speed Synchronous Generator and Implementing Its Voltage Control System Based on a Neural Network

TATEVOSYAN Andrey A. (*Omsk State Technical University, Omsk, Russia*) – *Docent of the Electrical Engineering Dept., Cand. Sci. (Eng.).*

A method for optimizing the parameters of a modular half-speed synchronous generator with permanent magnets (PMSG) and the generator voltage control system with a neural network-based algorithm are proposed. The basic design scheme of the modular half-speed PMSG is considered, which features a compact layout of the generator main parts, thereby ensuring the optimal use of the working volume, smaller sizes of the magnetic system, and smaller mass of the active materials used in manufacturing the machine. Owing to the simple and reliable design of the generator, its output parameters can be varied in a wide range with using standard electrical circuits for voltage stabilization and current rectification along with an additional voltage regulation unit. Owing to this feature, the design scheme of the considered generator has essential advantages over the existing analogs with a common cylindrical magnetic core. In view of these circumstances, the development of a high-efficient modular half-speed PMSG as an autonomous DC power source is of both scientific and practical interest; this generator can be used to supply power to a large range of electricity consumers located in rural areas, low-rise residential areas, military communities, allotments etc. In solving the problem of optimizing the generator's magnetic system, the main electrical machine analysis equation is obtained. The optimal ratios of the winding wire mass to the mass of permanent magnets and of the PM height to the air gap value for achieving the maximum specific useful power output have been determined. An analytical correlation between the optimal design parameters of a half-speed modular PMSG and its power performance parameters has been established. The expediency to develop a neural network-based control system is shown. The number of load-bearing modules of the half-speed PMSG is determined depending on the wind velocity, load factor and the required output voltage. The neural network was trained on the examples of a training sample using a laboratory test bench. The neural network was implemented in the MatLab 2019b environment by constructing a synchronous generator simulation model in the Simulink software extension. The possibility of using the voltage control system of a half-speed modular PMSG with a microcontroller for operation of the neural network platform of the Arduino family (ArduinoDue) independently of the PC is shown.

Key words: *design scheme, magnetic system optimization, modular half-speed synchronous generator, generator output voltage control system*

REFERENCES

1. **Arnol'd R.R.** *Raschet i proektirovanie magnitnyh sistem s postoyannymi magnitami* (Calculation and design of magnetic systems with permanent magnets). M.: Energiya, 1969, 184 p.
2. **Balagurov V.A., Galteev F.F.** *Elektricheskie mashiny s postoyannymi magnitami* (Electric machines with permanent magnets). M.: Energoatomizdat, 1988, 280 p.
3. **But D.A.** *Beskontaknye elektricheskie mashiny* (Contactless Electric machines). M.: Vysshaya shkola, 1990, 416 p.
4. **Ismagilov F.R., Gerasin A.A., Hayrullin I.H., Vavilov V.E.** *Elektromekhanicheskie sistemy s vysokokoertsitivnymi postoyannymi magnitami* (Electromechanical systems with high-coercive permanent magnets). M.: Mashinostroenie, 2014, 267 p.
5. **Krivtsov V.S., Oleynikov A.M., Yakovlev A.I.** *Neischerpaemaya energiya. Kn.1. Vetroelektrogeneratory* (Inexhaustible energy. Book 1. Wind power generators). Har'kov: HAI, 2003, 400 p.
6. **Krivtsov V.S., Oleynikov A.M., Yakovlev A.I.** *Neischerpaemaya energiya. Kn.2. Vetroenergetika* (Inexhaustible energy. Book 2. Wind Power Industry). Har'kov: HAI, 2004, 519 p.
7. **Smirnov A.Yu.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2017, No. 11, pp. 40–45.
8. **Zubkov Yu.V., Vladimirov D.A.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2020, No. 6, pp. 24–30.
9. **Oleynikov A.M., Kanov L.N., Zaritskaya E.I.** *Vestnik SevGTU: Mekhanika. Energetika. Ekologiya – in Russ. (Bulletin of SevSTU: Mechanics. Power engineering. Ecology)*, 2008, pp. 104–107.
10. **Patent RF No. 2303849, МПК H02K 21/18.** *Beskollektornyy sinhronnyy generator s postoyannymi magnitami* (Brushless synchronous generator with permanent magnets) / V.V. Shkondin, publ. 27.07.07, Bulletin No. 28.
11. **Patent RF No. 2693011, МПК H02K 21/14 (2006.01).** *Beskollektornyy sinhronnyy generator modul'nogo tipa s postoyannymi magnitami* (Modular Type brushless synchronous generator with permanent magnets) / A.A. Tatevosyan, publ. 01.07.2019, Bulletin No.19.
12. **Tatevosyan A.A.** *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy – in Russ. (Electrical and information systems and systems)*, 2019, vol. 15, No. 2, pp.15–25.
13. **Tatevosyan A.A., Ogorelkov B.I., Tatevosyan A.S.** *Omskiy nauchnyy vestnik – in Russ. (Omsk Scientific Bulletin)*, 2014, No. 3 (133), pp. 179–183.
14. **Tverdotel'nye rele serii SSR, TSR.** *Rukovodstvo pol'zovatelya* (SSR, TSR series solid-state relays. User's Guide) [Electron resource] URL: http://www.fotek.com.ua/webfm_send/148 (Date of appeal 17.05.2021).
15. **Arduino Support from MATLAB** [Electron resource] URL: <http://www.mathworks.com/hardware-support/arduino-matlab.html> (Date of appeal 17.05.2021).
16. **Arduino Support from Simulink** [Electron resource] URL: <https://www.mathworks.com/help/supportpkg/arduino/index.html> (Date of appeal 17.05.2021).

[25.01.2021]