

**А. Б. Менжинский, А. Н. Малашин, А. Е. Калед**

*Военная академия Республики Беларусь, Минск, Республика Беларусь*

## **МЕТОДИКА ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ**

**Аннотация.** Разработана методика параметрического анализа электрических генераторов возвратно-поступательного движения с постоянными магнитами, которая позволяет при заданном значении коэффициента полезного действия выявить значения параметров магнитопровода (площадь поперечного сечения) и рабочей обмотки (количество витков), обеспечивающих минимум удельной массы генератора. Методика параметрического анализа электрических генераторов возвратно-поступательного движения с постоянными магнитами состоит из трех этапов. Первый и второй этапы – это электромагнитный расчет генератора: на первом этапе определяются основные геометрические размеры магнитной системы и параметры рабочей обмотки генератора, на втором – проверка электромагнитного расчета генератора, расчет номинального режима, расчет коэффициента полезного действия и оценка теплового состояния генератора. На третьем этапе осуществляется параметрический анализ электрических генераторов возвратно-поступательного движения с постоянными магнитами с заданными ограничениями, а также уточнение геометрических размеров и конфигурации магнитной системы генератора по двумерной конечно-элементной модели магнитного поля. В результате этого для обеспечения лучшего использования электротехнической стали магнитопровода генератора и уменьшения тем самым его массы определяются наиболее насыщенные участки и участки, которые характеризуются низкими значениями напряженности магнитного поля. Отличительными особенностями предложенной методики являются: использование в качестве целевой функции минимума удельной массы электрических генераторов возвратно-поступательного движения с продольным, поперечным или комбинированным изменением магнитного потока, проходящего через рабочую обмотку; комбинированный подход к электромагнитному расчету; учет влияния рабочей температуры на параметры постоянного магнита, а также перегрев отдельных частей генератора.

**Ключевые слова:** методика параметрического анализа, электрический генератор, электромагнитный расчет, удельная масса, постоянный магнит

**Для цитирования:** Менжинский, А. Б. Методика параметрического анализа электрических генераторов возвратно-поступательного движения с постоянными магнитами / А. Б. Менжинский, А. Н. Малашин, А. Е. Калед // Вестн. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2021. – Т. 66, №4. – С. 458–469. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-4-458-469>

**Andrei B. Menzhinski, Andrei N. Malashin, Andrei E. Kaleda**

*Military Academy of the Republic of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

## **METHOD OF PARAMETRIC ANALYSIS OF RECIPROCATING ELECTRIC GENERATORS WITH PERMANENT MAGNETS**

**Abstract.** A method for the parametric analysis of electric generators of reciprocating motion with permanent magnets has been developed, which allows revealing the values of the parameters of the magnetic circuit (cross-sectional area) and the working winding (number of turns) at a given value of the efficiency, providing a minimum specific gravity of the generator. The method of parametric analysis of electric generators of reciprocating motion with permanent magnets consists of three stages. The first and second stages are the electromagnetic calculation of the generator: at the first stage, the main geometric dimensions of the magnetic system and the parameters of the working winding of the generator are determined; at the second stage, the verification of the electromagnetic calculation of the generator, calculation of the nominal mode, calculation of the efficiency and assessment of the thermal state of the generator are fulfilled. At the third stage, a parametric analysis of electric generators of reciprocating motion with permanent magnets with specified constraints is carried out, as well as the refinement of the geometric dimensions and configuration of the magnetic system of the generator using a two-dimensional finite element model of the magnetic field. As a result, to ensure better use of the electrical steel of the magnetic circuit of the generator and thereby reduce its mass, the most saturated areas and areas, which are characterized by low values of the magnetic field strength, are determined. Distinctive features of the proposed technique are: the use of a minimum specific gravity of electric generators of reciprocating motion with longitudinal, transverse or combined changes in the magnetic flux passing through the working winding as an objective function; combined approach to electromagnetic calculation; taking into account the influence of the operating temperature on the parameters of the permanent magnet, as well as overheating of individual parts of the generator.

**Keywords:** parametric analysis technique, electric generator, electromagnetic calculation, specific gravity, permanent magnet

**For citation:** Menzhinski A. B., Malashin A. N., Kaleda A. E. Method of parametric analysis of reciprocating electric generators with permanent magnets. *Vestsi Natsyyanal' nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnych navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2021, vol. 66, no. 4, pp. 458–469 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-4-458-469>

**Введение.** В последние годы наблюдается рост научных разработок в области электромеханических преобразователей энергии (ЭМПЭ) возвратно-поступательного движения [1–8]. Это связано с необходимостью улучшения энергетических и массогабаритных показателей электроагрегатов (ЭА), входящих в состав автономной системы электроснабжения (АСЭС). Большинство ЭА, входящих в состав АСЭС, строятся по традиционной схеме на базе двигателя внутреннего сгорания (ДВС) с кривошипно-шатунным механизмом и электрической машины вращательного типа [9, 10]. Характерными недостатками такого типа ЭА, которые напрямую определяют эффективность АСЭС, являются большая удельная масса и недостаточно высокий коэффициент полезного действия (КПД).

В качестве перспективного ЭМПЭ возвратно-поступательного движения рассматривается система «свободнопоршневой двигатель – электрический генератор возвратно-поступательного движения с постоянными магнитами (ЭГВПД с ПМ)» [1–4, 9, 11–14]. В [13] отмечено, что на среднесрочную перспективу (5–10 лет) в Республике Беларусь необходимо осуществить переход с дизель-генераторных силовых установок вращательного действия на свободнопоршневые дизель-генераторные установки на альтернативных экологически чистых видах топлива. Это, в свою очередь, требует развития теории электромеханики применительно к ЭГВПД. Из представленной в [15] классификации ЭГВПД видно, что возможен широкий спектр различных их структур. Однако существующие методики электромагнитного расчета и анализа таких ЭГВПД недостаточно полно учитывают все особенности их работы [14–17]. Это не позволяет в полной мере выработать рекомендации по электромагнитному расчету таких генераторов, а также определить эффективные условия их применения. Потери энергии, возникающие в ЭГВПД, выделяются в виде теплоты, повышающей температуру магнитопровода (МПр), ПМ и рабочей обмотки. Высокая температура рабочей обмотки является одной из основных причин, вызывающих старение изоляции [18]. Повышение температуры ПМ ухудшает его характеристики [16]. Все это уменьшает срок службы и ухудшает энергетические показатели ЭГВПД. В связи с этим учет влияния рабочей температуры на параметры ПМ, а также перегрева отдельных частей ЭГВПД при их электромагнитном расчете и анализе весьма важен.

С учетом сказанного разработка методики параметрического анализа ЭГВПД с ПМ для улучшения энергетических и массогабаритных показателей, учитывающей влияние рабочей температуры на параметры ПМ, а также перегрев отдельных частей генератора, представляет особую актуальность.

**Методика параметрического анализа электрических генераторов возвратно-поступательного движения.** Одним из важнейших массогабаритных показателей ЭГВПД с точки зрения применения их в АСЭС, особенно подвижных средств, является удельная масса [9]. Поэтому наиболее подходящим для решения задачи параметрического анализа генераторов является критерий «удельная масса» (кг/кВт).

Стремление обеспечить минимум этого критерия в большинстве случаев приводит к несколько заниженному КПД генератора [16]. Поэтому целесообразно в качестве одного из ограничений при параметрическом анализе генераторов использовать их КПД.

При разработке методики параметрического анализа ЭГВПД использовались подходы, изложенные в [14, 15, 17], дополненные расчетом магнитных систем с ПМ [16, 19–22]. Методика параметрического анализа ЭГВПД состоит из трех этапов. Первый и второй этапы – это электромагнитный расчет генератора (формирование области исходных данных для параметрического анализа). На первом этапе определяются основные геометрические размеры магнитной системы и параметры рабочей обмотки генератора. На втором этапе проводится проверка электромагнитного расчета генератора, расчет номинального режима, энергетических (КПД) показателей и оценка теплового состояния генератора. При неудовлетворительных результатах производится корректировка данных на первом этапе и расчет повторяется. На третьем этапе осуществляется параметрический анализ ЭГВПД с заданными ограничениями.

**Первый этап.** Для параметрического анализа ЭГВПД необходимо сформировать область исходных данных, которая включает следующие параметры ЭГВПД: номинальная активная мощность, отдаваемая генератором в сеть  $P_G$ , Вт; номинальное напряжение на зажимах генератора  $U_G$ , В; КПД генератора  $\eta$ ; объем ПМ  $V_{\text{ПМ}}$ , м<sup>3</sup>; магнитная индукция рабочей точки ПМ в режиме короткого замыкания (КЗ) генератора  $B_{\text{КЗ}}$ , Тл; магнитная индукция рабочей точки ПМ в номинальном режиме работы генератора  $B_p$ , Тл; параметры рабочей обмотки генератора  $w$ , шт., и площадь поперечного сечения МПр генератора  $S_{\text{МПр}}$ , м<sup>2</sup>.

**Расчет требуемого объема постоянных магнитов.** В электрических машинах вращательно-го типа известен ряд способов для предварительного определения объема ПМ [19–21]. Наиболее широкое практическое применение нашел способ А. Н. Ларионова, согласно которому [21]

$$V_{\text{ПМ}} = \frac{0,45 P_{\text{max}} k_m \sigma_p \alpha_1 k_d k_{\text{уд}}}{p k_\phi f H_{\text{м.КЗ}} \left[ (0,85 \dots 0,95) B_{r,20^\circ} (1 + \beta_B (t_{\text{ПМ}}^\circ - 20^\circ)) \right]}, \quad (1)$$

где  $P_{\text{max}}$  – максимальная активная мощность генератора (с учетом перегрузки), Вт;  $k_m$  – поправочный коэффициент, учитывающий худшее использование ПМ [15, 17];  $\sigma_p$  – коэффициент рассеяния, значение которого на начальном этапе электромагнитного расчета для ЭГВПД поперечного типа примем равным 1,05...1,3 [16], а для ЭГВПД продольного типа – представлены в [15];  $\alpha_1$  – коэффициент, учитывающий падение магнитного напряжения в магнитной цепи, значение которого для генераторов с одной парой зазоров примем равным 1,1...1,15, а для генераторов с двумя парами зазоров – 1,2...1,3;  $k_d$  – коэффициент приведения магнитодвижущей силы (МДС) реакции якоря по продольной оси к МДС ПМ 0,85...0,86;  $k_{\text{уд}}$  – коэффициент ударности, равный 1,1 – для генераторов с одной парой зазоров и 1,2 – для генераторов с двумя парами зазоров;  $p$  – количество пар полюсов (количество ПМ);  $k_\phi$  – коэффициент формы;  $f$  – частота тока, Гц;  $H_{\text{м.КЗ}}$  – напряженность поля в магните при установившемся КЗ генератора, А/м [16];  $[0,85 \dots 0,95] B_{r,20^\circ} (1 + \beta_B (t^\circ - 20^\circ))$  – индукция при холостом ходе в нейтральном сечении ПМ с учетом изменения температуры ПМ, Тл [16];  $\beta_B$  – температурный коэффициент индукции (для материала ПМ NdFeB,  $\beta_B \approx -8,9 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ) [16];  $B_{r,20^\circ}$  – остаточная индукция ПМ при нормальной температуре ПМ ( $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ), Тл;  $t_{\text{ПМ}}^\circ$  – температура ПМ,  $^\circ\text{C}$ .

**Предварительный расчет основных геометрических размеров постоянных магнитов и магнитопровода генератора.** Основные геометрические размеры ЭГВПД с продольным и поперечным изменением магнитного потока, проходящего через рабочую обмотку, показаны на рис. 1, *a* и *b* соответственно.

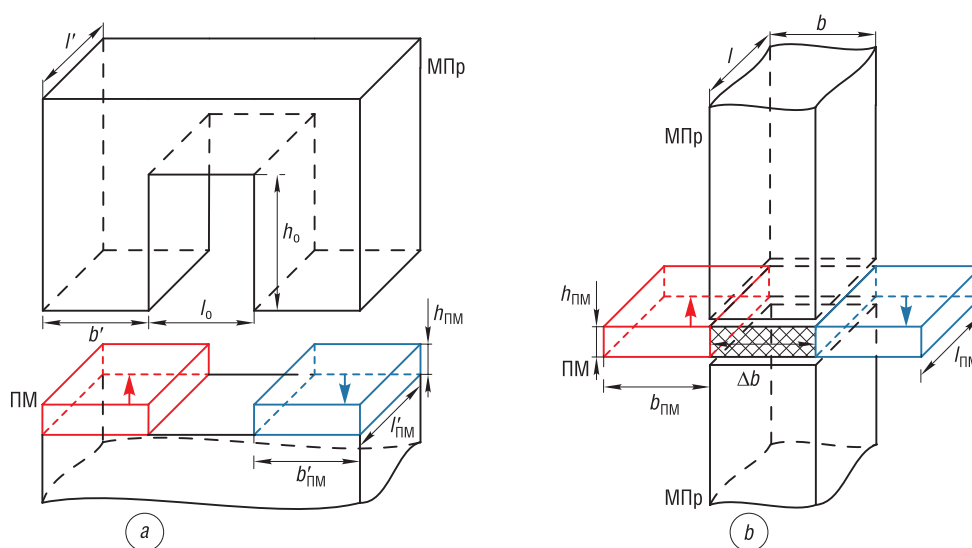


Рис. 1. Элемент магнитной системы электрического генератора возвратно-поступательного движения: *a* – продольного типа, *b* – поперечного типа

Fig. 1. Element of the magnetic system of the electric reciprocating generator: *a* – longitudinal type, *b* – cross type

Толщину ПМ  $h_{\text{ПМ}}$  следует задавать, ориентируясь на размеры, имеющиеся в каталоге фирм, придерживаясь рекомендации, что в диапазоне мощностей 10...1000 Вт можно принять  $h_{\text{ПМ}} = 2...6$  мм [16]. Для обеспечения единственной точки устойчивости равновесия подвижной части ЭГВПД поперечного типа величина изоляционной вставки (см. рис. 1, *b*)  $\Delta b$  принимается равной нулю [16]. С учетом этого амплитуда колебаний подвижной части ЭГВПД поперечного типа определяется из условия (см. рис. 1, *b*) [16]

$$x_{\text{max}} = 0,5b_{\text{ПМ}}. \quad (2)$$

Из уравнения (2) следует, что геометрические размеры поперечного сечения ПМ равны:

$$b_{\text{ПМ}} = 2x_{\text{max}}, \quad (3)$$

$$l_{\text{ПМ}} = V_{\text{ПМ}}/S_{\text{ПМ}}, \quad (4)$$

где  $S_{\text{ПМ}} = b_{\text{ПМ}}h_{\text{ПМ}}$  – площадь поперечного сечения ПМ генератора.

С учетом того что магнитный поток в полюсном наконечнике равен магнитному потоку в МПР ( $B_{\text{п.н}}S_{\text{п.н}} = B_{\text{ст max}}S_{\text{МПр}}$ ), геометрические размеры поперечного сечения МПР генератора равны: для ЭГВПД поперечного типа:

$$b = b_{\text{ПМ}}\sqrt{k[0,85...0,95]B_{r,20^\circ}(1 + \beta_{\text{В}}(t_{\text{ПМ}}^\circ - 20^\circ))[\sigma B_{\text{ст max}}]^{-1}}, \quad (5)$$

$$l = l_{\text{ПМ}}\sqrt{k[0,85...0,95]B_{r,20^\circ}(1 + \beta_{\text{В}}(t_{\text{ПМ}}^\circ - 20^\circ))[\sigma B_{\text{ст max}}]^{-1}}; \quad (6)$$

для ЭГВПД продольного типа:

$$b' = b'_{\text{ПМ}}\sqrt{k'[0,85...0,95]B_{r,20^\circ}(1 + \beta_{\text{В}}(t_{\text{ПМ}}^\circ - 20^\circ))[\sigma' B_{\text{ст max}}]^{-1}}, \quad (7)$$

$$l' = l'_{\text{ПМ}}\sqrt{k'[0,85...0,95]B_{r,20^\circ}(1 + \beta_{\text{В}}(t_{\text{ПМ}}^\circ - 20^\circ))[\sigma' B_{\text{ст max}}]^{-1}}, \quad (8)$$

где  $B_{\text{п.н}}$  – магнитная индукция в полюсном наконечнике МПР, Тл;  $S_{\text{п.н}}$  – площадь поперечного сечения полюсного наконечника генератора, м<sup>2</sup>;  $B_{\text{ст max}}$  – магнитная индукция насыщения стали МПР, Тл;  $S_{\text{МПр}}$  – площадь поперечного сечения МПР ( $S_{\text{МПр}} = lb$ ,  $S_{\text{МПр}} = l'b'$  – ЭГВПД поперечного и продольного типа соответственно), м<sup>2</sup>;  $k$  и  $\sigma$  – коэффициенты выпучивания и рассеяния магнитного потока в магнитной системе ЭГВПД поперечного типа [16];  $k'$  и  $\sigma'$  – коэффициенты выпучивания и рассеяния магнитного потока в магнитной системе ЭГВПД продольного типа [15, 22].

В целях повышения эффективного использования магнитного потока, геометрические размеры полюсных наконечников задаются несколько больше геометрических размеров ПМ:

$$S_{\text{п.н}} \approx (1...1,1) S_{\text{ПМ}}. \quad (9)$$

*Расчет рабочей точки постоянного магнита генератора.* С учетом изменения температуры магнитная индукция рабочей точки ПМ в номинальном режиме работы генератора равна [15]

$$B_{\text{р}} = B_{r,20^\circ}(1 + \beta_{\text{В}}(t_{\text{ПМ}}^\circ - 20^\circ))/\left(1 + G_{\text{ПМ}}(G_{\Sigma})^{-1}\right), \quad (10)$$

где  $G_{\text{ПМ}}$ ,  $G_{\Sigma}$  – усредненные на интервале повторяемости магнитная проводимость ПМ и суммарная внешняя магнитная проводимость магнитной системы генератора соответственно, Гн. При расчете  $G_{\text{ПМ}}$  и  $G_{\Sigma}$  учитываются основные геометрические размеры ПМ и МПР генератора [16].

*Расчет параметров рабочей обмотки.* Предварительное количество витков рабочей обмотки генератора равно [20]

$$w = 0,25E_{\text{ЭДС.о}}(k_{\text{ф}}k_{\text{о}}\Phi_{\text{о}}f)^{-1}, \quad (11)$$

где  $E_{\text{ЭДС.о}} = (1,2...1,4)U_{\text{н}}$  – действующее значение ЭДС движения генератора, В;  $k_{\text{о}}$  – обмоточный коэффициент;  $U_{\text{н}}$  – заданное напряжение в нагрузке (на зажимах генератора), В;  $\Phi_{\text{о}}$  – усредненный на интервале повторяемости магнитный поток через рабочую обмотку в режиме холостого хода, который учитывает особенности продольного, поперечного или комбинированного (продольно-поперечного) изменения магнитного потока, проходящего через рабочую обмотку, и определяется на основании законов Кирхгофа для магнитных цепей, Вб [15, 16].

Площадь поперечного сечения проводника рабочей обмотки определяется выражением [20]

$$S_{\text{пр}} = I_{\text{н}} J_{\text{зад}}^{-1}, \quad (12)$$

где  $I_{\text{н}} = P_{\text{н}}(U_{\text{н}} k_{\text{м}})^{-1}$  – ток в рабочей обмотке генератора, А;  $P_{\text{н}}$  – заданная активная мощность в нагрузке (отдаваемая генератором в сеть), Вт;  $k_{\text{м}}$  – заданный коэффициент мощности [23];  $J_{\text{зад}}$  – заданная плотность тока в рабочей обмотке генератора, выбирается в соответствии с предполагаемым типом охлаждения генератора [19]: с самовентиляцией – 4...10 А/мм<sup>2</sup>, с принудительным воздушным охлаждением – 10...16 А/мм<sup>2</sup>, с жидкостным охлаждением – 20...30 А/мм<sup>2</sup>.

Поскольку  $l_0 h_0 k_{\text{Cu}} = S_{\text{пр}} w$  [16], то глубина (высота) обмоточного окна равна

$$h_0 = S_{\text{пр}} w (l_0 k_{\text{Cu}})^{-1}, \quad (13)$$

где  $k_{\text{Cu}}$  – коэффициент заполнения окна по меди [16];  $l_0$  – ширина (длина) обмоточного окна, мм, условия выбора которой для ЭГВПД продольного типа представлены в [15, 24]. В [16] отмечено, что на начальном этапе электромагнитного расчета ЭГВПД поперечного типа с С-образным МПр и цилиндрическими ПМ, также с кольцевым МПр и плоскими ПМ целесообразно задать следующие размеры обмоточного окна:  $l_0 = (1,5...2)b_{\text{ПМ}}$ ,  $h_0 = 0,8b_{\text{ПМ}}$  и  $l_0 = 0,5l_{\text{ПМ}}$ ,  $h_0 = 0,6l_{\text{ПМ}}$  соответственно. Размеры обмоточного окна могут уточняться в процессе расчета.

Полное сопротивление рабочей обмотки генератора равно [15, 16]

$$Z_0 = \sqrt{R_0^2 + (2\pi f L_0)^2}, \quad (14)$$

где  $R_0 = \rho_{20^\circ} l_{\text{ср}} w (S_{\text{пр}})^{-1}$  – активное сопротивление рабочей обмотки генератора при нормальной температуре ( $t = 20^\circ \text{C}$ ), Ом ( $\rho_{20^\circ}$  – удельное сопротивление меди при нормальной температуре, Ом·мм<sup>2</sup>/м;  $l_{\text{ср}}$  – средняя длина витка рабочей обмотки генератора, м);  $L_0$  – собственная индуктивность рабочей обмотки генератора, Гн.

Активное сопротивление рабочей обмотки генератора с учетом изменения температуры определяется следующим образом [16]:

$$R_t = \rho_{20^\circ} \left(1 + \alpha_{\text{м}} (t_R^\circ - 20^\circ)\right) l_{\text{ср}} w (S_{\text{пр}})^{-1}, \quad (15)$$

где  $\alpha_{\text{м}}$  – температурный коэффициент удельного сопротивления для меди, °C<sup>-1</sup> [16];  $t_R^\circ$  – температура рабочей обмотки, °C.

**Второй этап.** Проверка режима короткого замыкания генератора. Проверка режима КЗ проводится по условию [15, 20, 21]

$$3 \leq I_{\text{КЗ}}/I_{\text{н}} \leq 4, \quad (16)$$

где  $I_{\text{КЗ}}$  – ток КЗ  $\left[ I_{\text{КЗ}} = E_{\text{ЭДС.о}} \left( \sqrt{R_t^2 + (2\pi f L_0)^2} \right)^{-1} \right]$ .

Проверка режима перегрузки (размагничивающего действия реакции якоря) генератора. Переход рабочей точки ПМ из  $A_0$  в  $A_1$  под действием напряженности магнитного поля реакции якоря  $H_{\text{ар}}$  представлен на рис. 2.

Во избежание размагничивания ПМ в режиме КЗ необходимо проверить перемещение рабочей точки ПМ на кривой размагничивания ПМ по выражению

$$B_{\text{КЗ}} = \left[ B_{r20^\circ} (1 + \beta_{\text{В}} (t_{\text{ПМ}}^\circ - 20^\circ)) / (1 + G_{\text{ПМ}} (G_{\Sigma})^{-1}) \right] - \left[ I_{\text{КЗ}} w G_{\Sigma} (\sigma_{\text{р}} S_{\text{ПМ}})^{-1} \right]. \quad (17)$$

Если  $A_1$  выходит за пределы линии перегиба кривой размагничивания (см. рис. 2), то необходимо либо изменить геометрические размеры ПМ (увеличить толщину), либо выбрать другой материал ПМ [16].

Проверка режима насыщения стали магнитопровода генератора. Проверка режима насыщения стали МПр генератора проводится по условию [15, 20]

$$B_m \leq B_{\text{ст max}}, \quad (18)$$

где  $B_m = \Phi_{\text{ст.м}}/S_{\text{МПр}}$  – амплитуда магнитной индукции в МПр, Тл;  $\Phi_{\text{ст.м}}$  – амплитуда магнитного потока в МПр, Вб. При невыполнении данного условия необходимо увеличить  $S_{\text{МПр}}$ .

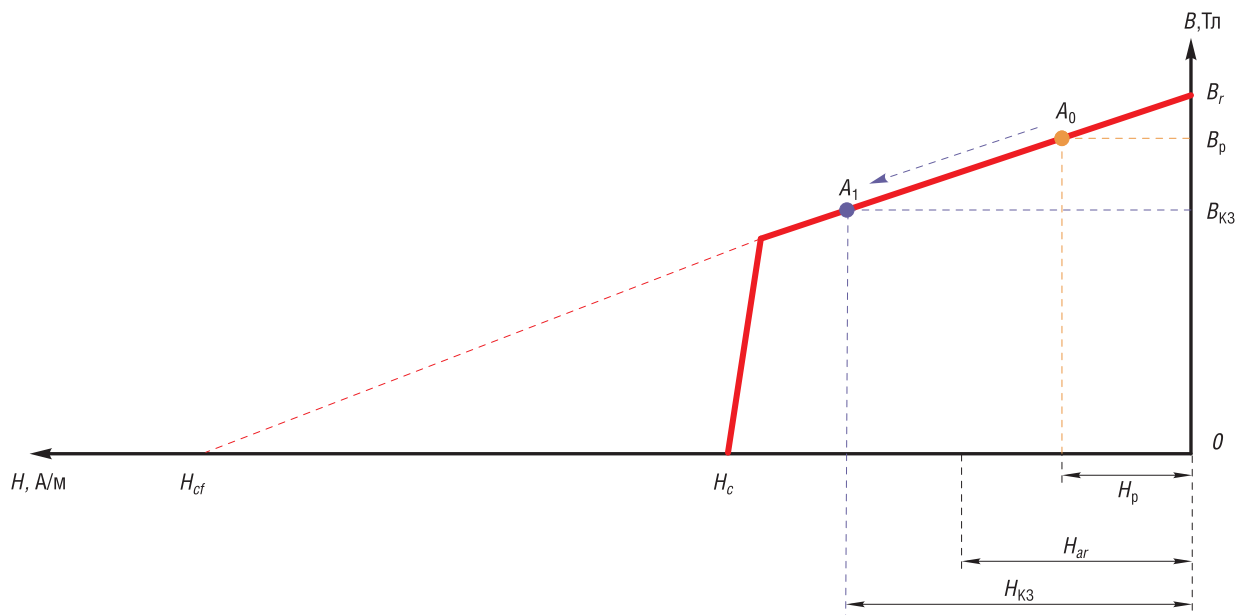


Рис. 2. Кривая размагничивания постоянного магнита под действием реакции якоря:  $A_0$  – рабочая точка постоянного магнита в номинальном режиме работы генератора;  $A_1$  – рабочая точка постоянного магнита при действии реакции якоря;  $B_{к3}$  – магнитная индукция рабочей точки постоянного магнита при действии реакции якоря;  $H_{к3}$  – напряженность магнитного поля рабочей точки постоянного магнита при действии реакции якоря;  $B_r$  – остаточная индукция постоянного магнита;  $B_p$  – магнитная индукция рабочей точки постоянного магнита в номинальном режиме работы генератора;  $H_p$  – напряженность магнитного поля рабочей точки постоянного магнита в номинальном режиме работы генератора;  $H_c$  – коэрцитивная сила по индукции;  $H_{cf}$  – фиктивная коэрцитивная сила

Fig. 2. Demagnetization curve of a permanent magnet under the action of the armature reaction:  $A_0$  – operating point of the permanent magnet in the nominal operating mode of the generator;  $A_1$  – operating point of a permanent magnet with an armature reaction;  $B_{к3}$  – magnetic induction of the operating point of a permanent magnet under the action of the armature reaction;  $H_{к3}$  – magnetic field strength of the operating point of a permanent magnet under the action of the armature reaction;  $B_r$  – residual induction of permanent magnet;  $B_p$  – magnetic induction of the operating point of the permanent magnet in the nominal operating mode of the generator;  $H_p$  – magnetic field strength of the operating point of the permanent magnet in the nominal operating mode of the generator;  $H_c$  – inductive coercive force;  $H_{cf}$  – fictitious coercive force

*Расчет номинального режима генератора.* Напряжение на зажимах генератора определяется как [16, 17, 20]

$$U_r = E_{\text{ЭДС}} - U_o, \tag{19}$$

где  $E_{\text{ЭДС}}$  – действующее значение реальной (несинусоидальной) кривой ЭДС движения генератора, которая учитывает особенности продольного, поперечного или комбинированного изменения магнитного потока, проходящего через рабочую обмотку, В [15];  $U_o = I_n \sqrt{R_t^2 + (2\pi f L_0)^2}$  – падение напряжения на сопротивлении рабочей обмотки, В.

Активная мощность, отдаваемая генератором в сеть [17, 23], равна

$$P_r = k_m U_r I_n. \tag{20}$$

Если номинальные параметры генератора не соответствуют заданным, то на соответствующих этапах методики электромагнитного расчета корректируются параметры  $V_{\text{ПМ}}$ ,  $S_{\text{МПр}}$ ,  $w$  и расчет повторяется.

*Расчет потерь и КПД генератора.* К основным потерям генератора относятся тепловые потери в рабочей обмотке ( $P_{\text{п.м}}$ ) и потери в стали МПр генератора ( $P_{\text{п.ст}}$ ). Поэтому основные суммарные потери в генераторе равны

$$P_{\Sigma\text{п}} = P_{\text{п.м}} + P_{\text{п.ст}}. \tag{21}$$

Тепловые потери в рабочей обмотке генератора вычисляются по выражению [16, 20]

$$P_{\text{п.м}} = I_n^2 \rho_{20^\circ} \left(1 + \alpha_m (t_R^\circ - 20^\circ)\right) l_{\text{ср}} w (S_{\text{МПр}})^{-1}. \tag{22}$$

Мощность потерь в стали МПР по первой гармонике определяется как [16]

$$P_{п.ст} = \rho_{\frac{1,0}{уд_{50}}} (0,02f)^{\beta} k_T m_{ст} B_m^2, \quad (23)$$

где  $\rho_{\frac{1,0}{уд_{50}}}$  – удельные потери в стали при индукции 1 Тл и частоте 50 Гц, Вт/кг;  $\beta \approx 1,5$ ;  $k_T$  – коэффициент технологичности;  $m_{ст}$  – масса стали МПР, кг.

КПД генератора рассчитывается по выражению

$$\eta = [P_r / (P_r + P_{\Sigma п} + P_d)] 100 \%, \quad (24)$$

где  $P_d$  – дополнительные неучтенные потери,  $P_d = (0,01 \dots 0,05)P_r$ .

*Оценка теплового состояния генератора.* Уравнения теплового баланса в установившемся состоянии можно записать в виде [16]

$$P_{с} = \alpha_0 S_{\Sigma} \Delta t_{к}^{\circ}, \quad (25)$$

где  $P_{с}$  – суммарные греющие потери, Вт;  $\alpha_0$  – коэффициент теплоотдачи поверхности корпуса при естественном охлаждении, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $S_{\Sigma}$  – суммарная площадь поверхности корпуса, м<sup>2</sup>;  $\Delta t_{к}^{\circ}$  – превышение температуры корпуса над температурой окружающей среды (перегрев корпуса).

Суммарные греющие потери равны

$$P_{с} = P_{п.м} + P_{п.ст}. \quad (26)$$

Для расчета  $\alpha_0$  в практике проектирования регулируемых синхронных вентильных двигателей с ПМ пользуются формулой [16]

$$\alpha_0 \approx 9 + 0,067 \Delta t_{к}^{\circ}. \quad (27)$$

Подставляя выражение (27) в уравнение (25), получим

$$0,067 S_{\Sigma} (\Delta t_{к}^{\circ})^2 + 9 S_{\Sigma} \Delta t_{к}^{\circ} - P_{с} = 0. \quad (28)$$

Согласно уравнению (28), перегрев корпуса может быть определен как

$$\Delta t_{к}^{\circ} = \left( \sqrt{81 S_{\Sigma}^2 + 0,268 S_{\Sigma} P_{с}} - 9 S_{\Sigma} \right) / 0,134 S_{\Sigma}. \quad (29)$$

Упростив уравнение (29), получим

$$\Delta t_{к}^{\circ} \approx \sqrt{4511 + 14,9 P_{с} S_{\Sigma}^{-1}} - 67,2. \quad (30)$$

В выражении не учитывается теплоотвод в местах крепления генератора к приводному двигателю или некоторой поверхности.

Зная  $\Delta t_{к}^{\circ}$ , перегрев обмотки и ПМ можно рассчитать по выражениям [16]:

$$\Delta t_{м}^{\circ} \approx \Delta t_{к}^{\circ} + (10 \div 20 \text{ }^{\circ}\text{C}), \quad (31)$$

$$\Delta t_{ПМ}^{\circ} \approx \Delta t_{м}^{\circ} - 10 \text{ }^{\circ}\text{C}. \quad (32)$$

В тех случаях когда  $\Delta t_{к}^{\circ}$ ,  $\Delta t_{м}^{\circ}$ ,  $\Delta t_{ПМ}^{\circ}$  больше допустимых значений, можно увеличить  $S_{пр}$  (при наличии в обмоточном окне места), тем самым уменьшая плотность тока в рабочей обмотке ( $J$ ). Если увеличить  $S_{пр}$  без изменения  $S_{МПР}$  и  $w$  нельзя, то можно либо увеличить  $S_{МПР}$  при сохранении прежней величины индукции, либо увеличить индукцию, сохранив прежнее  $S_{МПР}$ . В обоих случаях  $S_{пр}$  может быть увеличено за счет освободившегося в обмоточном окне места. Если  $\Delta t_{к}^{\circ}$ ,  $\Delta t_{м}^{\circ}$ ,  $\Delta t_{ПМ}^{\circ}$  меньше допустимых значений на 10–15 %, то можно уменьшать  $S_{пр}$ , тем самым увеличивать  $J$ , либо уменьшать геометрические размеры МПР [25].

**Третий этап.** Сформировав область исходных данных, далее необходимо решить задачу параметрического анализа ЭГВПД. Анализ результатов математического моделирования электромагнитных процессов в ЭГВПД [14, 24] показал, что с учетом выбранного критерия (удельная масса  $M_{уд} = m_r / P_r$ , где  $m_r$  – масса генератора [15]) целевую функцию «масса/мощность» целесообразней всего записать в виде

$$M_{уд}(S_{МПР}, w) \rightarrow \min, \quad (33)$$

где  $S_{МПР}$ ,  $w$  – переменные с шагом изменения  $\Delta_S$  и  $\Delta_w$  соответственно.

Отличие выражения (33) для разных типов ЭГВПД заключается в  $P_{\Gamma}$ , которая может учитывать особенности продольного, поперечного или комбинированного изменения магнитного потока, проходящего через рабочую обмотку, а также в конструктивных размерах генераторов.

Ограничения параметров работы генератора при этом записываются [14] следующим образом:

- 1)  $V_{\text{ПМ}} \geq V_{\text{ПМ.зад}}$ ;      2)  $B_{p1} \leq B_p \leq B_{p2}$ ;      3)  $B_m \leq B_{\text{ст max}}$ ;      4)  $U_{\Gamma.\text{зад}1} \leq U_{\Gamma} \leq U_{\Gamma.\text{зад}2}$ ;
- 5)  $P_{\Gamma.\text{зад}1} \leq P_{\Gamma} \leq P_{\Gamma.\text{зад}2}$ ;      6)  $\eta \geq \eta_{\text{зад}}$ ;      7)  $B_{K31} \leq B_{K3} \leq B_{K32}$ ;      8)  $3 \leq I_{K3}/I_n \leq 4$ ;
- 9)  $\Delta t_{\text{к}}^{\circ} \leq \Delta t_{\text{к.зад}}^{\circ}$ ,

где  $\eta$ ,  $\eta_{\text{зад}}$  – расчетное и заданное значения КПД генератора;  $P_{\Gamma}$ ,  $P_{\Gamma.\text{зад}1}$  и  $P_{\Gamma.\text{зад}2}$  – расчетное и заданные значения номинальной активной мощности, отдаваемой генератором в сеть;  $U_{\Gamma}$ ,  $U_{\Gamma.\text{зад}1}$  и  $U_{\Gamma.\text{зад}2}$  – расчетное и заданные значения номинального напряжения на зажимах генератора;  $B_m$  – расчетное значение амплитуды магнитной индукции в МПр генератора;  $V_{\text{ПМ}}$ ,  $V_{\text{ПМ.зад}}$  – расчетное и заданное значения объема ПМ;  $I_{K3}$  – расчетное значение тока КЗ;  $B_{K3}$ ,  $B_{K31}$  и  $B_{K32}$  – расчетное и заданные значения магнитной индукции рабочей точки ПМ в режиме КЗ генератора;  $B_p$ ,  $B_{p1}$  и  $B_{p2}$  – расчетное и заданные значения магнитной индукции рабочей точки ПМ в номинальном режиме работы генератора;  $\Delta t_{\text{к}}^{\circ}$ ,  $\Delta t_{\text{к.зад}}^{\circ}$  – расчетное и заданное значения перегрева корпуса генератора. При этом  $P_{\Gamma.\text{зад}1}$ ,  $P_{\Gamma.\text{зад}2}$ ,  $U_{\Gamma.\text{зад}1}$  и  $U_{\Gamma.\text{зад}2}$  задаются в зависимости от требуемой точности расчетов  $P_{\Gamma}$  и  $U_{\Gamma}$ , а также с учетом условия  $J = I_n S_{\text{МПр}}^{-1} \approx J_{\text{зад}}$ .

Математическая постановка задачи параметрического анализа ЭГВПД заключается в выявлении значения переменных  $S_{\text{МПр}}$  и  $w$ , обеспечивающих минимум удельной массы ( $M_{\text{уд}} = M_{\text{уд min}}$ ) ЭГВПД и удовлетворяющих заданным ограничениям. Для реализации разработанной методики параметрического анализа ЭГВПД выбран метод сканирования [26].

С учетом выбранной целевой функции «масса/мощность» (33) и заданных ограничений параметров работы генератора 1–9 третий этап методики в себя включает: расчет объема ПМ генератора ( $V_{\text{ПМ}} = \lambda S_{\text{МПр}} h_{\text{ПМ}}$ ), где  $\lambda = S_{\text{ПМ}}/S_{\text{МПр}}$  для различных марок электротехнических сталей может принимать разные значения (3.1); расчет магнитной индукции рабочей точки ПМ в номинальном режиме работы генератора (3.2); расчет амплитуды магнитной индукции в МПр генератора (3.3); расчет напряжения на зажимах генератора (3.4); расчет номинальной активной мощности, отдаваемой генератором в сеть (3.5); расчет КПД генератора (3.6); расчет магнитной индукции рабочей точки ПМ в режиме КЗ генератора (3.7); расчет тока в рабочей обмотке генератора в режиме КЗ (3.8); расчет перегрева корпуса генератора (3.9); расчет удельной массы генератора (3.10); выбор  $M_{\text{уд}} = M_{\text{уд min}}$  и соответствующих ей значений  $S_{\text{МПр}}$  и  $w$  (3.11); расчет суммарных потерь и КПД с учетом значений  $S_{\text{МПр}}$  и  $w$  (3.12); уточнение параметров генератора, геометрических размеров и конфигурации магнитной системы методом конечных элементов (МКЭ) (3.13). Для этого строится двухмерная конечно-элементная модель (ДКЭМ) магнитного поля генератора.

Основными этапами создания ДКЭМ являются [27]: ввод геометрических объектов; задание свойств сред, источников поля (задание тока в обмотках, для ПМ – коэрцитивной силы) и граничных условий (на внутренних и внешних границах областей задаются граничные условия Неймана и Дирихле); построение сетки конечных элементов во всех блоках, входящих в расчетную область. Затем посредством математической модели на основе уравнений Кирхгофа и Пуассона для векторного магнитного потенциала проводится уточнение номинальных параметров генератора [28]. После чего по ДКЭМ осуществляется уточнение геометрических размеров и конфигурации магнитной системы ЭГВПД. На данном этапе выявляются наиболее насыщенные участки и участки, характеризующиеся низкими значениями напряженности магнитного поля, в целях обеспечения лучшего использования электротехнической стали МПр и уменьшения тем самым его массы. Использование комбинированного подхода, сочетающего теории поля и магнитных цепей, к электромагнитному расчету ЭГВПД позволит сократить затраты на их создание за счет уменьшения продолжительности проектирования и экспериментальной доработки. Методику параметрического анализа ЭГВПД можно представить в виде алгоритма, блок-схема которого представлена на рис. 3.



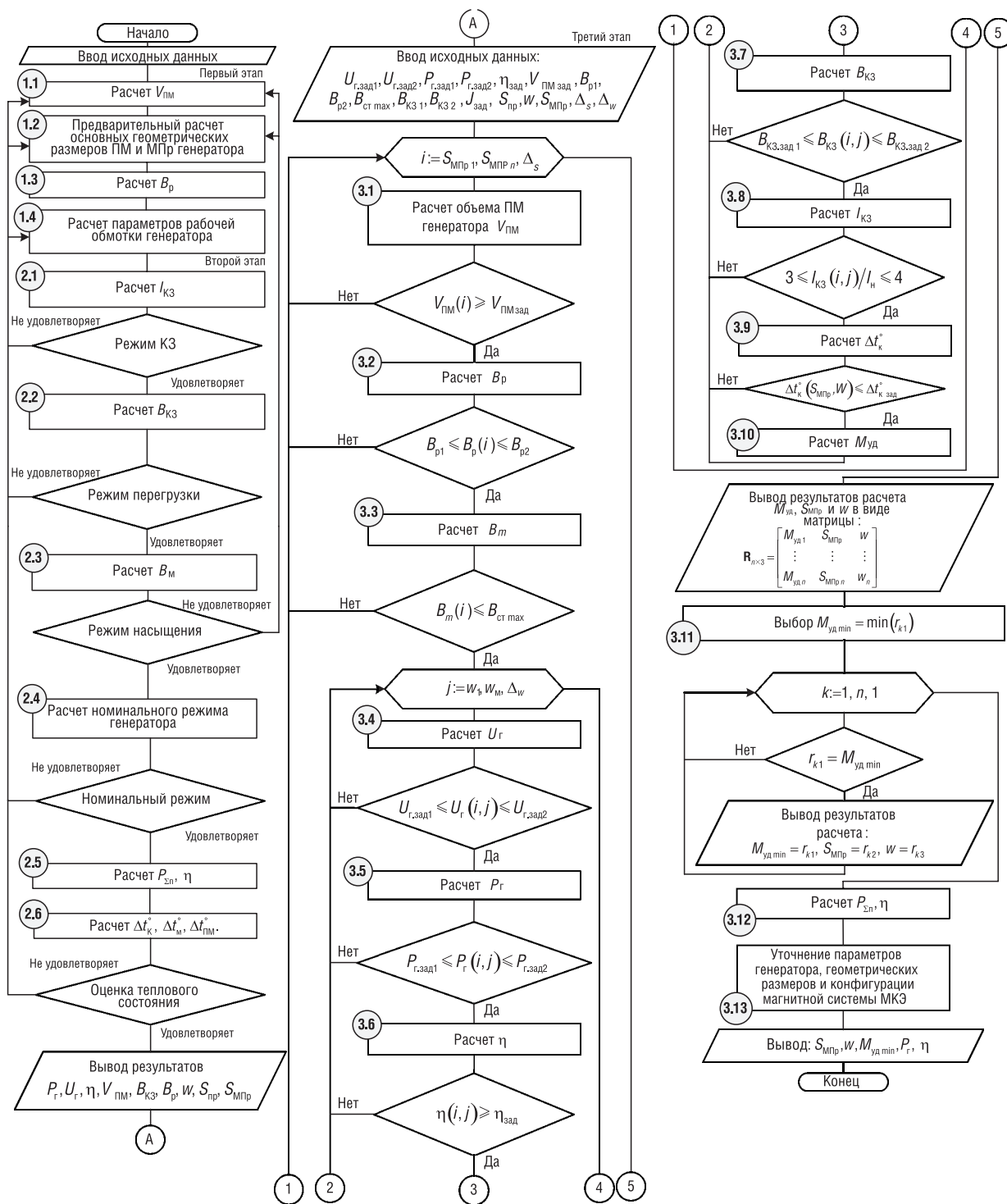


Рис. 3. Блок-схема алгоритма параметрического анализа электрического генератора возвратно-поступательного движения по критерию минимум удельной массы

Fig. 3. Block diagram of the parametric analysis algorithm for electric generators of reciprocating motion according to the criterion of minimum specific mass

**Заклучение.** Разработанная методика параметрического анализа ЭГВПД с ПМ позволяет при заданном значении КПД выявить значения параметров магнитопровода (площадь поперечного сечения) и рабочей обмотки (количество витков), обеспечивающих минимум удельной массы генератора. Отличительными особенностями разработанной методики являются: использование в качестве целевой функции минимум удельной массы ЭГВПД с продольным, поперечным

или комбинированным изменением магнитного потока, проходящего через рабочую обмотку; комбинированный подход к электромагнитному расчету; учет влияния рабочей температуры на параметры ПМ, а также перегрева отдельных частей ЭГВПД.

Научная значимость полученных результатов заключается в развитии теории электромеханики применительно к электрическим генераторам возвратно-поступательного движения, а именно в разработке методики их параметрического анализа для улучшения энергетических и массогабаритных показателей. Предложенная методика использовалась в государственной инженерной компании.

### Список использованных источников

1. Dynamic modeling of a SI/HCCI free-piston engine generator with electric mechanical valves / C.J. Chiang [et al.] // *Appl. Energy*. – 2013. – Vol. 102. – P. 336–346. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.07.033>
2. Multi-dimensional scavenging analysis of a free-piston linear alternator based on numerical simulation / Jinlong Mao [et al.] // *Appl. Energy*. – 2011. – Vol. 88, №4. – P. 1140–1152. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.10.003>
3. Design considerations of a linear generator for a range extender application / Un-Jae Seo [et al.] // *Arch. Electrical Eng.* – 2015. – Vol. 64, №4. – P. 581–592. <https://doi.org/10.1515/ae-2015-0043>
4. Decoupling design and verification of a free-piston linear generator / Peng Sun [et al.] // *Energies*. – 2016. – Vol. 9, №12. – 1067. <https://doi.org/10.3390/en9121067>
5. Wang, J. Design optimization of radially magnetized, iron-cored, tubular permanent-magnet machines and drive systems / J. Wang, D. Howe // *IEEE Trans. Magn.* – 2004. – Vol. 40, №5. – P. 3262–3277. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2004.833424>
6. A low-power, linear, permanent-magnet generator/energy storage system / Jiabin Wang [et al.] // *IEEE Trans. Ind. Electron.* – 2002. – Vol. 49, №3. – P. 640–648. <https://doi.org/10.1109/TIE.2002.1005391>
7. Faiz, J. Reduction of cogging force in linear permanent-magnet generators / J. Faiz, M. Ebrahimi-Salari, Gh. Shahgholian // *IEEE Trans. Magn.* – 2010. – Vol. 46, №1. – P. 135–140. <https://doi.org/10.1109/tmag.2009.2027900>
8. Conventional and TFPM linear generators for direct-drive wave energy conversion / H. Polinder [et al.] // *IEEE Trans. Energy Convers.* – 2005. – Vol. 20, №2. – P. 260–267. <https://doi.org/10.1109/tec.2005.845522>
9. Зачепа, Ю. В. Автономные системы электроснабжения на базе асинхронных генераторов, основные требования и структура / Ю. В. Зачепа // *Электромех. і енергозберігаючі системи*. – 2010. – Вип. 2. – С. 32–40.
10. Цыркин, М. И. Дизельные агрегаты резервного питания / М. И. Цыркин, А. Я. Гольдингер. – СПб.: Чистое письмо, 2003. – 276 с.
11. Hansson, J. Analysis and control of a hybrid vehicle powered by a free-piston energy converter: licentiate thesis in electrical systems / J. Hansson. – Stockholm, 2006. – XI, 111 l.
12. Темнов, Э. С. Разработка теоретических основ расчета и конструирования малоразмерных двигатель-генераторных установок как единой динамической системы: дис. ... канд. техн. наук : 05.04.02 / Э. С. Темнов. – Тула, 2005. – 134 л.
13. Тракторы XXI века: состояние и перспективы / С. Н. Поддубко [и др.]. – Минск: Беларус. навука, 2019. – 207 с.
14. Менжинский, А. Б. Методика структурно-параметрического синтеза комбинированного генератора возвратно-поступательного типа для энергоустановок робототехнических комплексов на базе свободнопоршневого двигателя / А. Б. Менжинский, А. Н. Малашин // *Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук*. – 2018. – Т. 63, №2. – С. 229–243. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-2-229-243>
15. Менжинский, А. Б. Универсальная методика электромагнитного расчета возвратно-поступательных электрических генераторов с поперечным и продольным нелинейным изменением магнитного потока / А. Б. Менжинский, А. Н. Малашин, Ю. Г. Коваль // *Изобретатель*. – 2019. – №5–6. – С. 38–48.
16. Хитерер, М. Я. Синхронные электрические машины возвратно-поступательного движения: учеб. пособие / М. Я. Хитерер, И. Е. Овчинников. – СПб.: Корона принт, 2013. – 357 с.
17. Тарашев, С. А. Вентильный линейный генератор для систем электропитания автономных объектов: дис. ... канд. техн. наук : 05.09.01 / С. А. Тарашев. – Самара, 2011. – 129 л.
18. Брускин, Д. Э. Электрические машины и микромашины: учебник / Д. Э. Брускин, А. Е. Зорохович, В. С. Хвостов. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1990. – 527 с.
19. Бут, Д. А. Бесконтактные электрические машины: учеб. пособие / Д. А. Бут. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1990. – 416 с.
20. Балагуров, В. А. Электрические машины с постоянными магнитами / В. А. Балагуров, Ф. Ф. Галтеев, А. Н. Ларионов; под ред. А. Н. Ларионова. – М.; Л.: Энергия, 1964. – 480 с.
21. Балагуров, В. А. Электрические генераторы с постоянными магнитами / В. А. Балагуров, Ф. Ф. Галтеев. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.
22. Менжинский, А. Б. Разработка уточненных электромагнитных моделей электрических генераторов возвратно-поступательного движения с постоянными магнитами / А. Б. Менжинский, А. Н. Малашин, П. Б. Менжинский // *Энергетика. Изв. вузов. и энергет. об-ний СНГ*. – 2021. – Т. 64, №4. – С. 291–302. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-4-291-302>

23. Фираго, Б.И. Теория электропривода: учеб. пособие / Б.И. Фираго, Л.Б. Павлячик. – Изд. 2-е. – Минск: Техноперспектива, 2007. – 585 с.
24. Менжинский, А. Б. Исследование электромагнитных процессов в возвратно-поступательных электрических генераторах с продольным и комбинированным нелинейным изменением магнитного потока / А. Б. Менжинский, А. Н. Малашин, О. В. Сидяко // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2019. – № 4. – С. 45–59.
25. Белопольский, И.И. Расчет трансформаторов и дросселей малой мощности / И.И. Белопольский, Л. Г. Пикалова. – М.: Л., Госэнергоиздат, 1963. – 272 с.
26. Абрамов, О.В. Методы и алгоритмы параметрического синтеза стохастических систем / О.В. Абрамов // Проблемы управления. – 2006. – № 4. – С. 3–8.
27. ELCUT. Моделирование электромагнитных, тепловых и упругих полей методом конечных элементов. Версия 6.3.1 [Электронный ресурс]: рук. пользователя. – СПб.: Тор, 2018. – Режим доступа: [https://elcut.ru/downloads/manual\\_r\\_rocktet.pdf](https://elcut.ru/downloads/manual_r_rocktet.pdf) – Дата доступа: 24.05.2018.
28. Менжинский, А. Б. Математическая модель генератора комбинированной конструкции возвратно-поступательного типа / А. Б. Менжинский, А. Н. Малашин, Ю. Г. Коваль // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2018. – № 2. – С. 74–85.

## References

1. Chia-Jui Chiang, Jing-Long Yang, Shao-YaLan, Tsung-Wei Shei, Wen-Shu Chiang, Bo-Liang Chen. Dynamic modeling of a SI/HCCI free-piston engine generator with electric mechanical valves. *Applied Energy*, 2013, vol. 102, pp. 336–346. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.07.033>
2. Mao, Jinlong, Zuo Zhengxing, Li Wen, Feng Huihua. Multi-dimensional scavenging analysis of a free-piston linear alternator based on numerical simulation. *Applied Energy*, 2011, vol. 88, no. 4, pp. 1140–1152. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.10.003>
3. Un-Jae Seo, Riemer B., Appunn R., Hameyer K. Design considerations of a linear generator for a range extender application. *Archives of Electrical Engineering*, 2015, vol. 64, no. 4, pp. 581–592. <https://doi.org/10.1515/ae-2015-0043>
4. Peng Sun, Chi Zhang, Jinhua Chen, Fei Zhao, Youyong Liao, Guilin Yang, Chinyin Chen. Decoupling design and verification of a free-piston linear generator. *Energies*, 2016, vol. 9, no. 12, 1067. <https://doi.org/10.3390/en9121067>
5. Wang J., Howe D. Design optimization of radially magnetized, iron-cored, tubular permanent-magnet machines and drive systems. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2004, vol. 40, no. 5, pp. 3262–3277. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2004.833424>
6. Jiabin Wang, Weiya Wang, Jewell G. W., Howe D. A low-power, linear, permanent-magnet generator/energy storage system. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2002, vol. 49, no. 3, pp. 640–648. <https://doi.org/10.1109/TIE.2002.1005391>
7. Faiz J., Ebrahimi-Salari M., Shahgholian J. Reduction of cogging force in linear permanent-magnet generators. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2010, vol. 46, no. 1, pp. 135–140. <https://doi.org/10.1109/tmag.2009.2027900>
8. Polinder H., Mecrow B. C., Jack A. G., Dickinson P. G., Mueller M. A. Conventional and TFPM linear generators for direct-drive wave energy conversion. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2005, vol. 20, no. 2, pp. 260–267. <https://doi.org/10.1109/tec.2005.845522>
9. Zachepa Yu. V. Autonomous power supply systems based on asynchronous generators, basic requirements and structure. *Elektromekhanichni i energozberigayuchi sistemi = Electromechanical and Energy Saving Systems*, 2010, iss. 2, pp. 32–40 (in Russian).
10. Tsyarkin M. I., Gol'dinger A. Ya. *Diesel Backup Power Units*. St. Petersburg, Chistoepis'mo Publ., 2003. 276 p. (in Russian).
11. Hansson J. *Analysis and Control of a Hybrid Vehicle Powered by a Free-Piston Energy Converter*. Stockholm, 2006. 111 p.
12. Temnov E. S. *Development of Theoretical Bases for the Calculation and Design of Small-Sized Engine-Generator Sets as a Single Dynamic System*. Tula, 2005. 134 p. (in Russian).
13. Poddubko S. N., Amel'chenko P. A., Stasilevich A. G., Vityaz' P. A., Dubovik D. A., Vashchula A. V., Zhukovskii I. N., Klyuchnikov A. V. *21<sup>st</sup> Century Tractors: State and Prospects*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2019. 207 p. (in Russian).
14. Menzhinskii A. B., Malashin A. N., Method of structural-parametric synthesis of a combined reciprocating generator for power plants of robotic complexes based on a free-piston engine. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2018, no. 2, pp. 229–243 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-2-229-243>
15. Menzhinskii A. B., Malashin A. N., Koval' J. G. Universal method for electromagnetic calculation of reciprocating electric generators with transverse and longitudinal nonlinear changes in magnetic flux. *Izobretatel' = Inventor*, 2019, no. 5–6, pp. 38–48 (in Russian).
16. Khiterer M. Ya., Ovchinnikov I. E. *Synchronous Electric Reciprocating Machines*. St. Petersburg, Korona-print Publ., 2013. 368 p. (in Russian).
17. Tarashev S. A. *Valve Linear Generator for Power Supply Systems of Autonomous Objects*. Samara, 2011. 129 p. (in Russian).
18. Bruskin D. E., Zorohovich A. E., Hvostov B. C. *Electric Machines and Micromachines*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1990. 527 p. (in Russian).
19. But D. A. *Contactless Electrical Machines*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1990. 416 p. (in Russian).

20. Balagurov V. A., Galteev F. F., Larionov A. N. *Electric Generators with Permanent Magnets*. Moscow, Energiya Publ., 1964. 480 p. (in Russian).
21. Balagurov V. A., Galteev F. F. *Electric Generators with Permanent Magnets*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 280 p. (in Russian).
22. Menzhinskii A. B., Malashin A. N., Menzhinskii P. B. Development of Refined Electromagnetic Models of Reciprocating Electric Generators with Permanent Magnets. *Energetika. Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij i energeticheskikh ob'edinenij SNG = ENERGETIKA. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*, 2021, vol. 64, no. 4, pp. 291–302 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-4-291-302>
23. Firago B. I., Pavlyachik L. B. *Electric Drive Theory*. Minsk, Tekhnoperspektiva Publ., 2007. 585 p. (in Russian).
24. Menzhinskii A. B., Malashin A. N., Sidyako O. V. Investigation of electromagnetic processes in reciprocating electric generators with longitudinal and combined nonlinear changes in magnetic flux. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. P. O. Sukhogo = Bulletin of Gomel State Technical University named P. O. Sukhoi*, 2019, no. 4, pp. 45–59 (in Russian).
25. Belopol'skii I. I., Pikalova L. G. *Calculation of Transformers and Low-Power Inductors*. Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1963. 272 p. (in Russian).
26. Abramov O. V. Methods and algorithms for the parametric synthesis of stochastic systems. *Problemy upravleniya [Management Problems]*, 2006, no. 4, pp. 3–8 (in Russian).
27. *ELCUT Modeling of electromagnetic, thermal, and elastic fields by the finite element method. Version 6.3.1*. St. Petersburg, Tor Publ., 2018. Available at: [https://elcut.ru/downloads/manual\\_r\\_pocket.pdf](https://elcut.ru/downloads/manual_r_pocket.pdf) (accessed 24 May 2018) (in Russian).
28. Menzhinskii A. B., Malashin A. N., Koval' Yu. G. Mathematical model of the generator of the combined design of reciprocating type. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. P. O. Sukhogo = Bulletin of Gomel State Technical University named P. O. Sukhoi*, 2018, no. 2, pp. 74–85 (in Russian).

### Информация об авторах

*Менжинский Андрей Борисович* – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и систем электропитания, Военная академия Республики Беларусь (пр. Независимости, 220, 220057, Минск, Республика Беларусь). E-mail: volna05011990@mail.ru

*Малашин Андрей Николаевич* – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры электротехники и систем электропитания, Военная академия Республики Беларусь (пр. Независимости, 220, 220057, Минск, Республика Беларусь).

*Калёда Андрей Евгеньевич* – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры электротехники и систем электропитания, Военная академия Республики Беларусь (пр. Независимости, 220, 220057, Минск, Республика Беларусь).

### Information about the authors

*Andrei B. Menzhinsky* – Ph. D. (Engineering), Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Power Supply Systems, Military Academy of the Republic of Belarus (220, Nezavisimosti Ave., 220057, Minsk, Republic of Belarus). E-mail volna05011990@mail.ru

*Andrei N. Malashin* – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of Electrical Engineering and Power Supply Systems, Military Academy of the Republic of Belarus (220, Nezavisimosti Ave., 220057, Minsk, Republic of Belarus).

*Andrei E. Kaleda* – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of Electrical Engineering and Power Supply Systems, Military Academy of the Republic of Belarus (220, Nezavisimosti Ave., 220057, Minsk, Republic of Belarus).