

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)
УДК 621.313
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-229-243>

Поступила в редакцию 16.02.2018
Received 16.02.2018

А. Б. Менжинский, А. Н. Малашин

Военная академия Республики Беларусь, Минск, Беларусь

МЕТОДИКА СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА КОМБИНИРОВАННОГО ГЕНЕРАТОРА ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ТИПА ДЛЯ ЭНЕРГОУСТАНОВОК РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ НА БАЗЕ СВОБОДНОПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ

Аннотация. Система энергоснабжения современных робототехнических комплексов требует разработки электромеханических преобразователей энергии с высокими энергетическими и минимальными массогабаритными показателями. В связи с этим в качестве перспективной энергоустановки рассматривается свободнопоршневой двигатель с электрическим генератором.

Интерес к исследованию энергоустановок на базе свободнопоршневых двигателей обусловлен рядом преимуществ в сравнении с классическими двигателями внутреннего сгорания с кривошипно-шатунным механизмом: относительной простотой конструкции; на 40 % меньшим количеством элементов, что в 2,5–3 раза увеличивает габаритную мощность, удельную массу и металлоемкость свободнопоршневого двигателя; сниженным на 30 % расходом топлива. Также важное конструктивное преимущество энергоустановок на базе свободнопоршневых двигателей – это сравнительно легкое их модульное исполнение. В разрабатываемых энергоустановках на базе свободнопоршневых двигателей зарубежных стран (США, Россия, Германия, Китай, Великобритания, Япония, Швеция, Израиль и др.) в качестве электрической машины переменного тока чаще всего применяются возвратно-поступательные электрические генераторы с поперечным приращением магнитного потока. Основным недостатком такого типа генераторов являются отсутствие согласования электрической и механической подсистем энергоустановки в крайних точках рабочего цикла, что ограничивает эффективность использования свободнопоршневого двигателя и снижает надежность энергоустановки.

Для решения этой проблемы было предложено использовать электромеханический преобразователь энергии с поперечным и продольным приращением магнитного потока (комбинированный генератор). Однако в настоящее время отсутствует научно обоснованная методика синтеза такого типа генератора. С целью решения этой задачи была разработана методика структурно-параметрического синтеза комбинированного генератора возвратно-поступательного типа для энергоустановки на базе свободнопоршневого двигателя, основанная на использовании удельной массы комбинированного генератора в качестве целевой функции, что позволяет синтезировать электрическую машину возвратно-поступательного типа с заданным КПД и минимальной удельной массой.

Ключевые слова: методика структурно-параметрического синтеза, комбинированный генератор возвратно-поступательного типа, возвратно-поступательный электрический генератор, свободнопоршневой двигатель

Для цитирования: 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 // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – Т. 63, № 2. – С. 229–243. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-2-229-243>

A. B. Menzhinski, A. N. Malashin

Military Academy of the Republic of Belarus, Minsk, Belarus

METHODS OF STRUCTURAL AND PARAMETRIC SYNTHESIS OF COMBINED GENERATOR OF RECIPROCATING POWER PLANTS FOR ROBOTIC SYSTEMS ON THE BASIS OF A FREE PISTON ENGINE

Abstract. Power supply system of advanced robotic systems requires the development of electromechanical energy converters with high energy and minimum weight and overall dimensions. In this regard, a free piston engine with an electric generator is considered as a promising plant.

Interest in the study of power plants based on free piston engines is caused by several advantages compared to conventional internal combustion engines with a crank mechanism: relative simplicity of the design, 40 % fewer elements, which reduces the overall capacity, specific gravity and metal content of the free piston engine in 2.5–3 times. In addition, the fuel consumption is 30 % lower. Also an important design advantage of power plants based on free piston engines is a relatively

simple modular construction. Reciprocating electric generators with transverse increment of the magnetic flux are the most commonly used ones in currently developed power plants based on free piston engines of foreign countries (USA, Russia, Germany, China, UK, Japan, Sweden, Israel, etc.) as the electrical AC machines. The main disadvantage of this type of generators are the absence of coordination of electrical and mechanical subsystems of the power plant at the extreme points of the operating cycle, which limits the efficiency of the free piston engine and reduces the reliability of the power plant.

To solve this problem it is proposed to use Electromechanical energy Converter with transverse and longitudinal increment of the magnetic flux (combo generator). However, currently there is no scientifically valid method of synthesis of this type of generator. To address this problem we have developed the methodology of structural and parametric synthesis of combined generator of the reciprocating type for a plant on the basis of free piston engine, which is based on the use of the specific gravity of the combined generator as the objective function. It allows synthesizing electric machine of the reciprocating type with the specified efficiency and minimum specific mass.

Key words: methods of structurally-parametrical synthesis, combined reciprocating generator, reciprocating electric generator, free piston engine

For citation. Menzhinski A. B., Malashin A. N. Methods of structural and parametric synthesis of combined generator of reciprocating power plants for robotic systems on the basis of 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, vol. 63, no. 2, pp. 229–243 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-2-229-243>

Введение. Система энергоснабжения современных робототехнических комплексов требует разработки электромеханических преобразователей энергии с высокими энергетическими и минимальными массогабаритными показателями [1]. В связи с этим в качестве перспективной энергоустановки рассматривается свободнопоршневой двигатель (СПД) с электрическим генератором [2–4].

Основной особенностью такой системы является отсутствие кривошипно-шатунного механизма в конструкции двигателя. Это позволяет увеличить его КПД до 50–60 %, габаритную мощность – в 2,5–3 раза, снизить удельную массу и металлоемкость СПД [2], а также удельный расход топлива приводного двигателя до 140 г/кВт·ч, реализовать модульную структуру, увеличить ресурс до капитального ремонта до 50 тыс. ч [3, 4].

В разрабатываемых энергоустановках на базе СПД зарубежных стран (США, Россия, Германия, Китай, Великобритания, Япония, Швеция, Израиль и др.) в качестве электрической машины переменного тока чаще всего применяются возвратно-поступательные электрические генераторы с поперечным приращением магнитного потока (ВПЭГ с ПМП) [2–4]. Основным их недостатком являются отсутствие согласования ВПЭГ с ПМП и СПД в крайних точках рабочего цикла, что ограничивает эффективность использования СПД и снижает надежность энергоустановки.

Для решения проблемы согласования электрической и механической подсистем энергоустановки на базе СПД в крайних точках рабочего цикла в [5, 6] предлагалось использование электромеханического преобразователя энергии с поперечным и продольным приращением магнитного потока (комбинированного генератора). В [7] оценена эффективность использования такого генератора в энергоустановке на базе СПД в качестве электрической машины. Однако в настоящее время отсутствует научно обоснованная методика синтеза такого типа генератора. Для решения этой задачи была разработана методика структурно-параметрического синтеза комбинированного генератора возвратно-поступательного типа для энергоустановки на базе свободнопоршневого двигателя, основанная на использовании удельной массы комбинированного генератора в качестве целевой функции. Это позволяет синтезировать электрическую машину возвратно-поступательного типа с заданным КПД и минимальной удельной массой.

Методика структурно-параметрического синтеза комбинированного генератора. Блок-схема алгоритма методики структурно-параметрического синтеза комбинированного генератора возвратно-поступательного типа для энергоустановки на базе СПД представлена на рис. 1.

Рассмотрим более подробно этапы методики структурно-параметрического синтеза комбинированного генератора.

1. Расчет количества уравновешенных модулей ($N_{у.м.}$) и электрической мощности одного модуля ($P_{мод.}$) энергоустановки, проводится на основе графика потребляемой нагрузки ($P_{потр.}(t)$). Под уравновешенным модулем понимается совокупность двух СПД, с электрическим генератором работающих в противофазе [6].

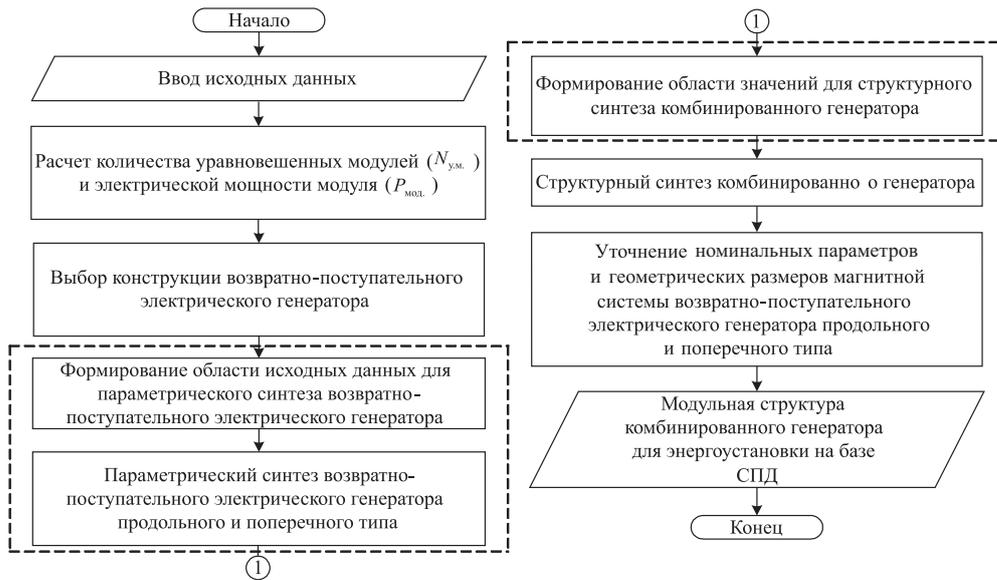


Рис. 1. Блок-схема алгоритма методики структурно-параметрического синтеза комбинированного генератора возвратно-поступательного типа

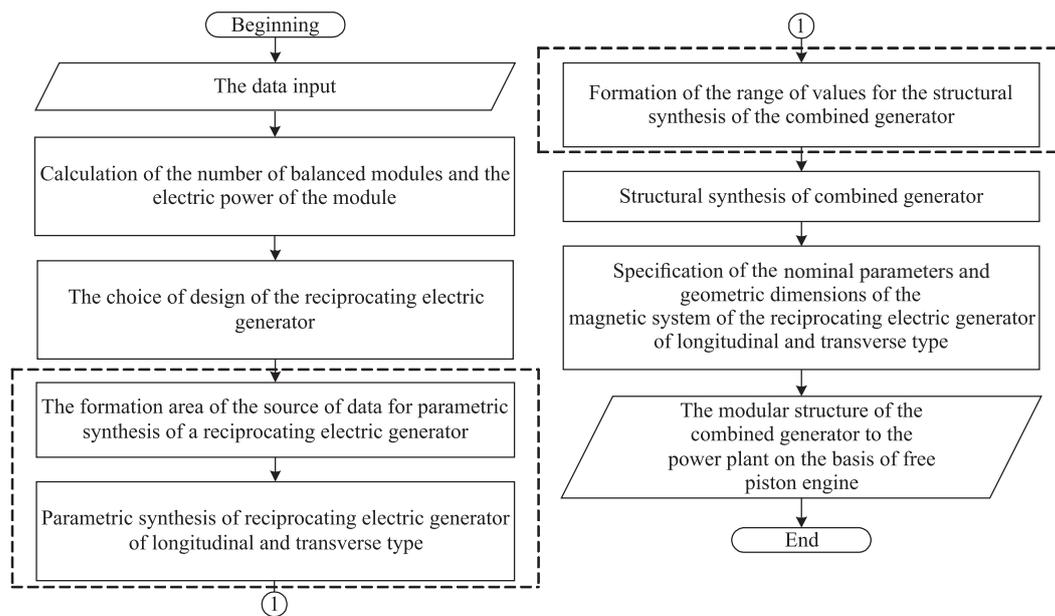


Fig. 1. Block diagram of the algorithm of methodology of structural and parametric synthesis of combined reciprocating generator

$$N_{y.m.} = \frac{P_{пол.}}{\frac{1}{t} \int_0^t P_{потр.}(t) dt}, \quad P_{мод.} = \frac{1}{2t} \int_0^t P_{потр.}(t) dt,$$

где $P_{пол.}$ – потребляемая активная электрическая мощность; $\frac{1}{t} \int_0^t P_{потр.}(t) dt$ – среднее значение потребляемой активной электрической мощности по графику потребляемой нагрузки.

2. Выбор конструкции ВПЭГ продольного типа осуществляется в соответствии с величиной рабочего хода СПД и эффективными интервалами применения ВПЭГ продольного типа. Эффективный интервал применения достигает: однополярного ВПЭГ продольного типа – 25–40 мм; разнополярного ВПЭГ продольного типа – 30–50 мм.

Конструкция ВПЭГ поперечного типа выбирается в соответствии с существующими конструктивными исполнениями этих типов генераторов [8].

3. Формирование области исходных данных для параметрического синтеза ВПЭГ осуществляется по алгоритму, блок-схема которого представлена на рис. 2.

При построении алгоритма формирования области исходных данных для параметрического синтеза ВПЭГ использовались подходы, изложенные в [9, 10] и дополненные расчетом магнитных систем с постоянными магнитами [8, 11].

Согласно алгоритму (рис. 2), на данном этапе методики проводится электромагнитный расчет ВПЭГ в мощностном диапазоне $[P_{\text{мин.}}, P_{\text{мод.}}]$, с некоторым шагом $\Delta = (P_{\text{мод.}} - P_{\text{мин.}})/D$, где $P_{\text{мин.}}$ – активная минимальная электрическая мощность одного модуля, значение которой целесообразно выбирать из интервала 300–2000 Вт. Погрешность расчетов будет тем меньше, чем меньше Δ .

Проблема синтеза оптимальной конструкции ВПЭГ сводится к нахождению оптимальных параметров их магнитной системы. Стремление обеспечить минимум критерия «удельная масса» в большинстве случаев приводит к заниженному уровню КПД генератора [8]. Поэтому целесообразно в качестве одного из ограничений при нахождении оптимальных параметров магнитной системы ВПЭГ использовать КПД генератора (η).

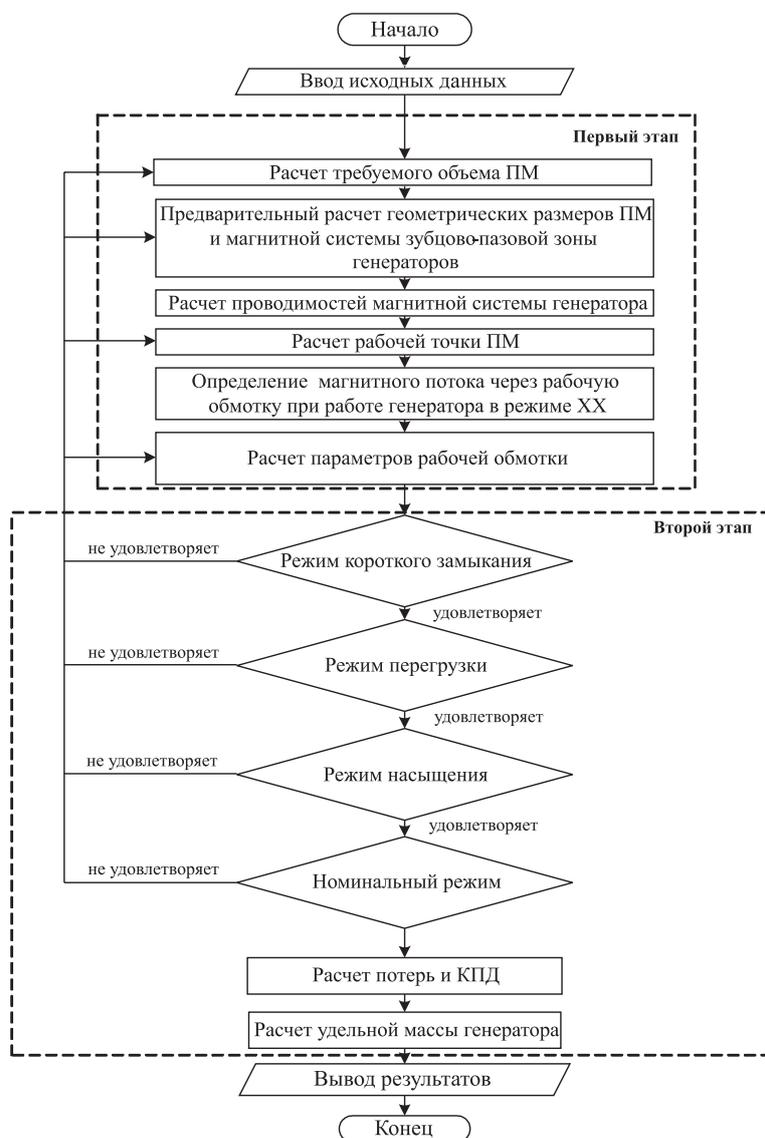


Рис. 2. Блок-схема алгоритма формирования области исходных данных для параметрического синтеза возвратно-поступательного электрического генератора

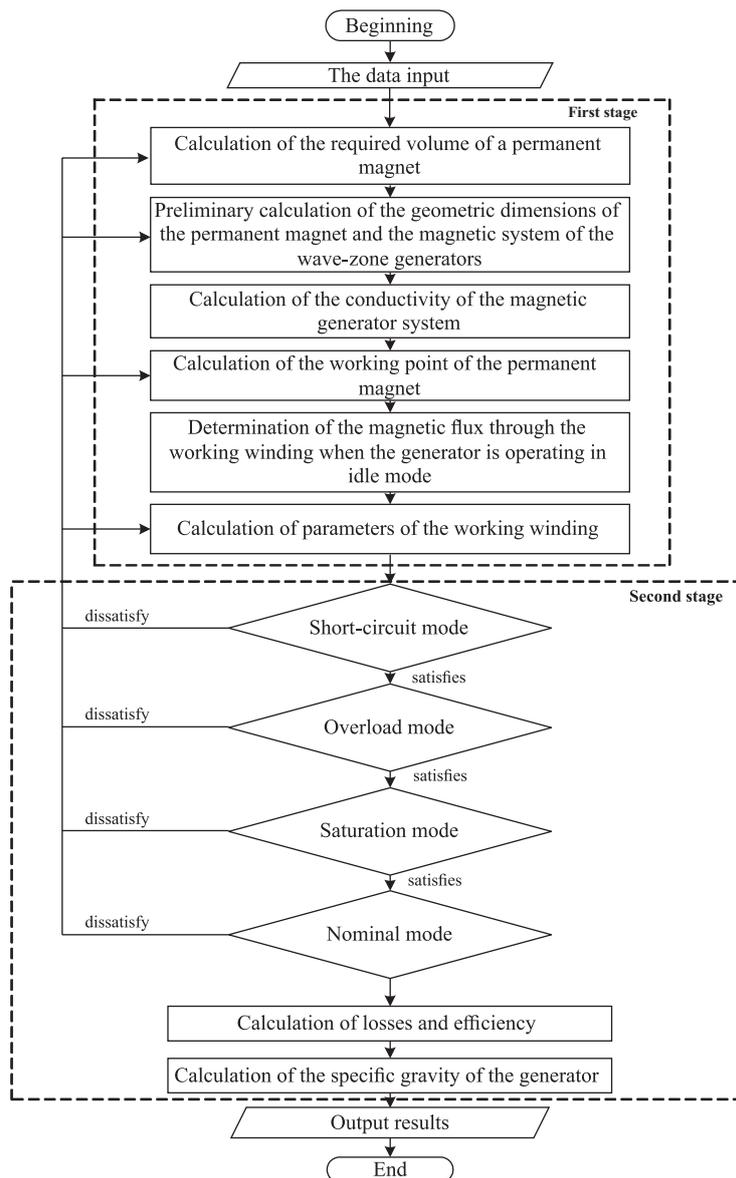


Fig. 2. Block diagram of algorithm of formation area of the source of data for parametric synthesis of a reciprocating electric generator

В качестве переменных параметров магнитной системы ВПЭГ приняты площадь поперечного сечения магнитопровода генератора (S) и количество витков рабочей обмотки генератора (w). Данные, полученные на основании алгоритма (рис. 2), представлены в виде зависимостей удельной массы ($\hat{M}_{уд.}$) и КПД ($\hat{\eta}$) ВПЭГ продольного типа от количества витков рабочей обмотки и величины площади поперечного сечения магнитопровода генератора, которые в нормированном виде показаны на рис. 3 и 4.

Из этих рисунков видно, что между S и w существует некоторое оптимальное соотношение, при котором удельная масса ВПЭГ продольного типа достигает минимального значения, а КПД соответствует заданному значению. Поэтому становится актуальной задача параметрического синтеза ВПЭГ, решение которой с заданными ограничениями и условиями работы позволит найти оптимальное соотношение S и w , а также соответствующую ему минимальную удельную массу ВПЭГ.

4. Проведенные в отчетах о НИР № 3061/17 «Разработка технических предложений по усовершенствованию фиксаторов мачты и антенного поста базовой мобильной быстроразвертываемой платформы типа МБРП-30-200» и № 3042/17 «Обоснование ТТТ для модернизации радиостанции

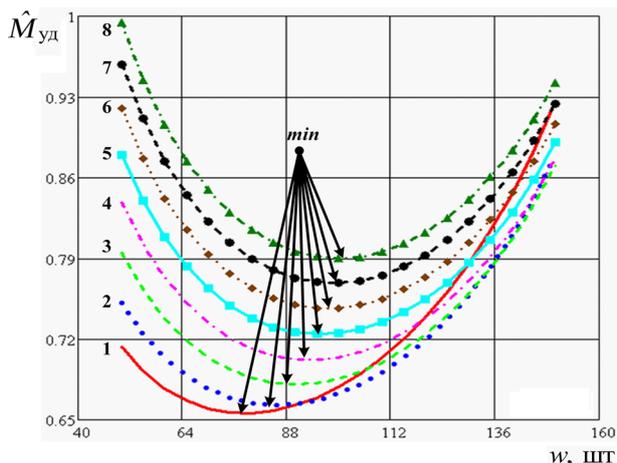


Рис. 3. Зависимость удельной массы от w при $S_7 > S_6 > S_5 > S_4 > S_3 > S_2 > S_1$

Fig. 3. Dependence of the mass from the w at $S_7 > S_6 > S_5 > S_4 > S_3 > S_2 > S_1$

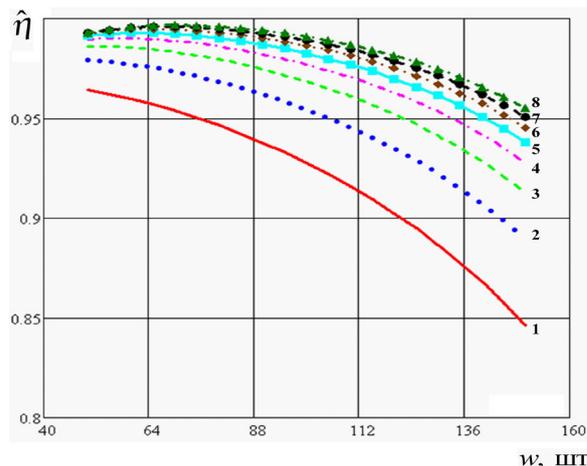


Рис. 4. Зависимость КПД от w при $S_7 > S_6 > S_5 > S_4 > S_3 > S_2 > S_1$

Fig. 4. Dependence of the efficiency on w if $S_7 > S_6 > S_5 > S_4 > S_3 > S_2 > S_1$

P-140-0,5 и P-140-M» (оба – Минск, 2017) рассуждения и общие соотношения позволяют записать целевую функцию «удельная масса» для решения задачи параметрического синтеза ВПЭГ продольного и поперечного типа в следующем виде:

$$\frac{M_{\Gamma}(S, w)}{E_{\text{эдс.хх}}(S, w)I_{\text{н}} - I_{\text{н}}^2 \sqrt{R_o^2(S, w) + X_{\text{ло}}^2(S, w)}} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где S и w – переменные, $M_{\Gamma}(S, w)$ – полная масса генератора; $E_{\text{эдс.хх}}(S, w)$ – ЭДС холостого хода генератора, $I_{\text{н}}$ – действующий ток в цепи генератора, $R_o(S, w)$ – активное сопротивление рабочей обмотки, $X_{\text{ло}}(S, w)$ – индуктивное сопротивление рабочей обмотки генератора.

Отличия выражения (1) для ВПЭГ продольного и поперечного типа заключаются в составляющих, которые учитывают особенности продольного и поперечного приращения магнитного поля, а также в конструктивных размерах генераторов.

Системы ограничений параметров (*) и условий (**) работы генератора при этом записываются в виде

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta(S, w) \geq \eta_{\text{зад.}}; \\ P_{\text{вых 1}} \leq P_{\text{вых}}(S, w) \leq P_{\text{вых 2}}; \\ U_{\text{вых 1}} \leq U_{\text{вых}}(S, w) \leq U_{\text{вых 2}}; \\ B_m(S) \leq B_{\text{макс.}}; \\ V_m(S) \geq V_{\text{м. треб.}} \end{array} \right\} *, \quad \left\{ \begin{array}{l} 3 \leq I_{\text{кз}}(S, w)/I_{\text{н}} \leq 4; \\ j(S, w) \leq j_{\text{зад.}}; \\ B_{\text{кз. зад. 2}} \leq B_{\text{кз}}(S, w) \leq B_{\text{кз. зад. 1}}; \\ B_{\text{р. зад. 2}} \leq B_{\text{р}}(S) \leq B_{\text{р. зад. 1}} \end{array} \right\} **, \quad (2)$$

где $\eta(S, w)$ и $\eta_{\text{зад.}}$ – расчетное и заданное значения КПД ВПЭГ; $P_{\text{вых}}(S, w)$, $P_{\text{вых 1}}$ и $P_{\text{вых 2}}$ – расчетное и заданные значения выходной активной электрической мощности ВПЭГ; $U_{\text{вых}}(S, w)$, $U_{\text{вых 1}}$ и $U_{\text{вых 2}}$ – расчетное и заданные значения действующего напряжения на зажимах ВПЭГ; $B_m(S)$ и $B_{\text{макс.}}$ – расчетное и заданное значения амплитуды магнитной индукции в магнитопроводе ВПЭГ; $V_m(S)$ и $V_{\text{м. треб.}}$ – расчетное и заданное значения объема постоянного магнита (позволяет обеспечить заданную перегрузку); $I_{\text{кз}}(S, w)$ – расчетное значение тока короткого замыкания; $j_{\text{зад.}}$ – плотность тока в рабочей обмотке; $B_{\text{кз}}(S, w)$, $B_{\text{кз. зад. 1}}$ и $B_{\text{кз. зад. 2}}$ – расчетное и заданные значения магнитной индукции рабочей точки ПМ при коротком замыкании; $B_{\text{р}}(S)$, $B_{\text{р. зад. 1}}$ и $B_{\text{р. зад. 2}}$ – расчетное и заданные значения магнитной индукции рабочей точки ПМ в номинальном режиме работы генератора.

Решение подобного класса задач может осуществляться одним из прямых методов оптимизации [12]. В разработанной методике применялся метод сканирования с ограничениями [13].

При этом начальные значения и границы интервалов поиска значений независимых переменных предварительно уточнялись в процессе электромагнитного расчета ВПЭГ, что значительно сократило время расчета. Блок-схема алгоритма параметрического синтеза ВПЭГ по критерию «минимум удельной массы» представлена на рис. 5. Алгоритм реализован в программной среде Mathcad 14.0.

Результатом решения задачи параметрического синтеза при заданных исходных данных является оптимальное соотношение между S и w , а также соответствующие ему минимальная удельная масса ($m_{уд}$) и заданный КПД (η) ВПЭГ, значения которых показаны в табл. 2 и являются необходимыми данными для структурного синтеза комбинированного генератора.

Таблица 2. Данные для структурного синтеза комбинированного генератора в мощностном диапазоне [$P_{мин.}$, $P_{мод.}$]

Table 2. Data for structural synthesis of the combined generator in the power range [$P_{min.}$, $P_{mod.}$]

$P, \text{Вт}$	ВПЭГ продольного типа			ВПЭГ поперечного типа		
	$m_{уд}, \text{кг/кВт}$	$P_{\Sigma\text{пот.}}, \text{Вт}$	$\eta, \%$	$m_{уд}, \text{кг/кВт}$	$P_{\Sigma\text{пот.}}, \text{Вт}$	$\eta, \%$
$P_{мин.}$	$m_{уд1}$	$P_{\Sigma\text{пот.}1}$	η_1	$m_{уд1}$	$P_{\Sigma\text{пот.}1}$	η_1
P_1	$m_{уд2}$	$P_{\Sigma\text{пот.}2}$	η_2	$m_{уд2}$	$P_{\Sigma\text{пот.}2}$	η_2
...
$P_{мод.}$	$m_{удn}$	$P_{\Sigma\text{пот.}n}$	η_n	$m_{удn}$	$P_{\Sigma\text{пот.}n}$	η_n

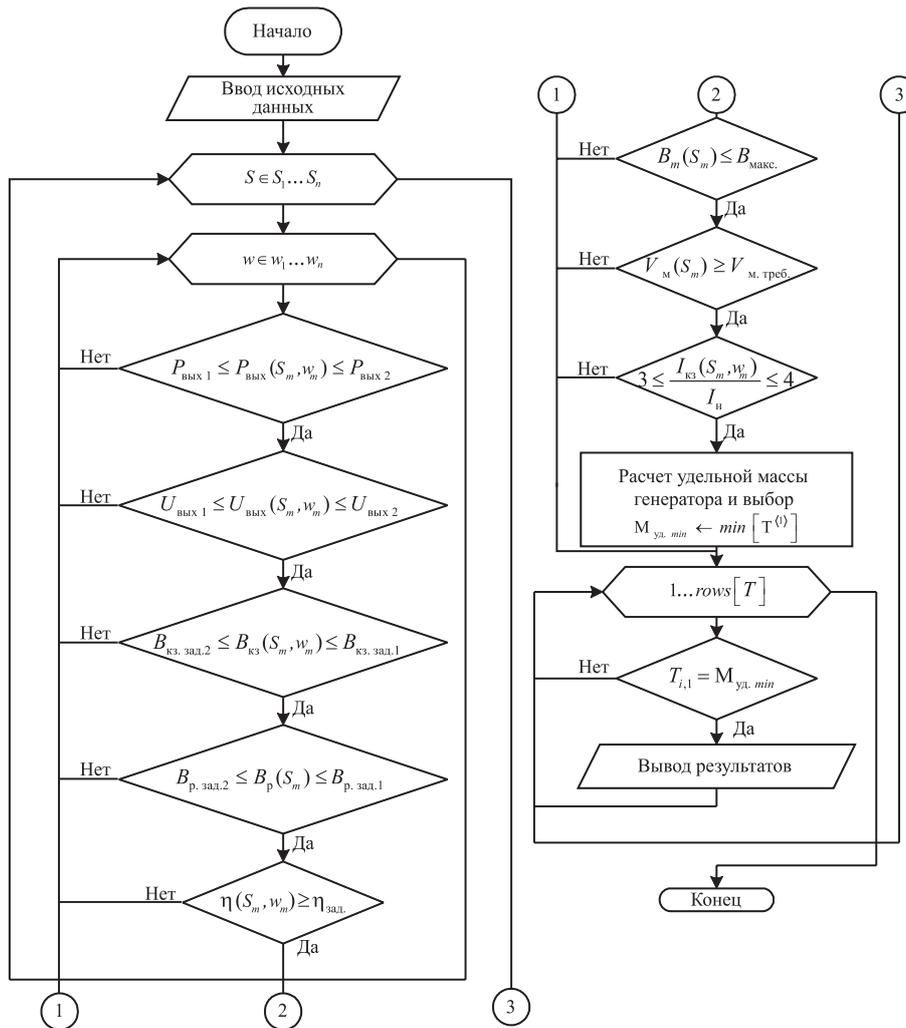


Рис. 5. Блок-схема алгоритма параметрического синтеза возвратно-поступательного электрического генератора по критерию «минимум удельной массы»

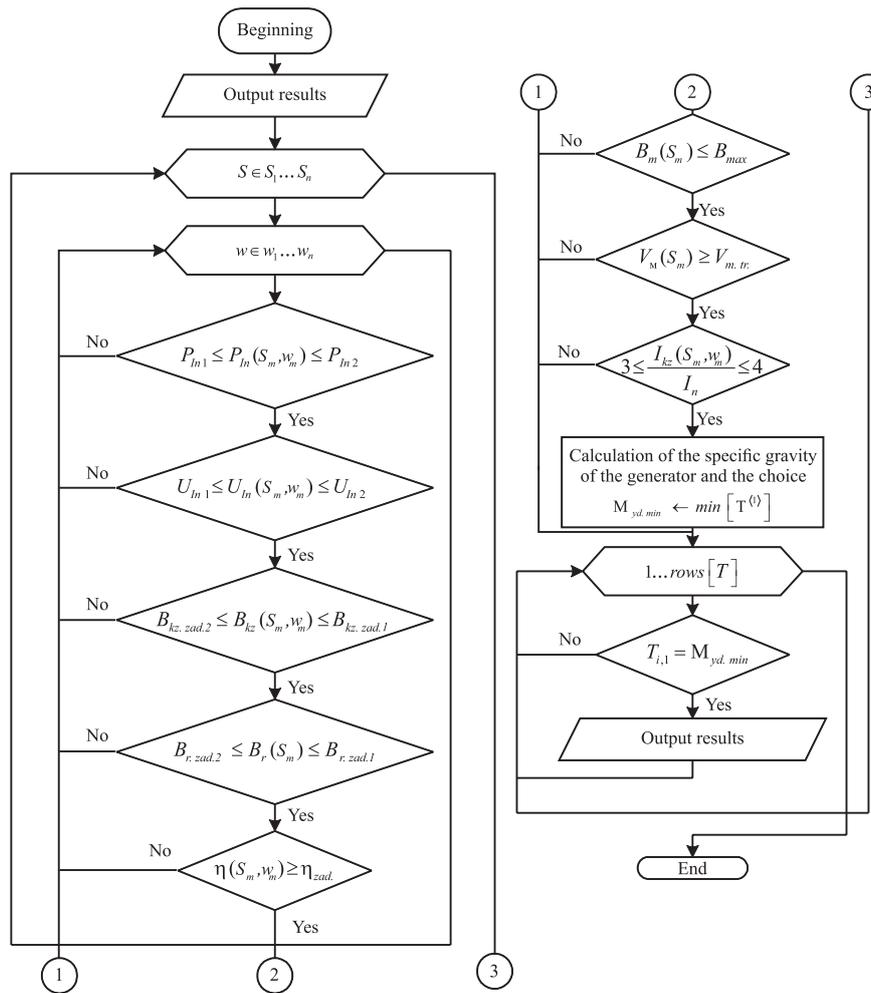


Fig. 5. Block diagram of the algorithm of parametric synthesis of a reciprocating electric generator according to the criterion of “minimum specific gravity”

В программной среде Mathcad 14.0 табл. 2 представляется в виде матриц: b – матрица ВПЭГ поперечного типа и q – матрица ВПЭГ продольного типа:

$$b = \begin{pmatrix} Y_1 & m_{\text{уд. ВПГ с Пр.МП}_1} & \eta_1 & P_{\Sigma\text{пот.1}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_n & m_{\text{уд. ВПГ с Пр.МП}_n} & \eta_n & P_{\Sigma\text{пот.}n} \end{pmatrix}, \quad q = \begin{pmatrix} X_1 & m_{\text{уд. ВПГ с ПМП}_1} & \eta_1 & P_{\Sigma\text{пот.1}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_n & m_{\text{уд. ВПГ с ПМП}_n} & \eta_n & P_{\Sigma\text{пот.}n} \end{pmatrix},$$

где $Y_1 \dots Y_n$ – активная мощность ВПЭГ поперечного типа, $X_1 \dots X_n$ – активная мощность ВПЭГ продольного типа, $P_{\Sigma\text{пот.}}$ – суммарные потери в рабочей обмотке и магнитопроводе ВПЭГ.

5. На основании области значений (табл. 2), полученных в процессе электромагнитного расчета и параметрического синтеза ВПЭГ продольного и поперечного типа, решается задача структурного синтеза комбинированного генератора. В процессе этого синтеза определяются оптимальное соотношение между активными мощностями ВПЭГ продольного (Y) и поперечного (X) типа и количество их модулей M и N , что обеспечивает минимум удельной массы синтезируемого комбинированного генератора с заданным КПД.

С учетом этого и [7] математическая запись целевой функции «удельная масса» для комбинированного генератора примет вид

$$\frac{NXm_{\text{уд. ВПЭГ с ПМП}} + MYm_{\text{уд. ВПЭГ с Пр.МП}}}{NX + MY} \rightarrow \min, \quad (3)$$

где $m_{уд.ВПЭГсПМП}$ – удельная масса ВПЭГ поперечного типа при активной мощности X ; $m_{уд.ВПЭГсПр.МП}$ – удельная масса ВПЭГ продольного типа при активной мощности Y ; N, M, X и Y – переменные.

С учетом возможной структуры комбинированного генератора возвратно-поступательного типа, системы ограничений были записаны в отчете о НИР № 3042/17 «Обоснование ТТТ для модернизации радиостанции Р-140-0,5 и Р-140-М» (Минск, 2017) в следующем виде:

для параллельно включенных генераторов:

$$\begin{cases} NX + MY = P_{зад.}; \\ \eta_{ВПЭГ с ПМП} \geq \eta_{зад.1}; \\ \eta_{ВПЭГ с Пр.МП} \geq \eta_{зад.2}. \end{cases}$$

для последовательно включенных генераторов:

$$\begin{cases} NX + MY = P_{зад.}; \\ \frac{P_{вых}}{P_{вых} + P_{\Sigma,потери. ВПЭГ с ПМП} + P_{\Sigma,потери. ВПЭГ с Пр.МП}} \geq \eta_{зад.} \end{cases}$$

Блок-схема алгоритма структурного синтеза комбинированного генератора по критерию «минимум удельной массы» представлена на рис. 6. Алгоритм реализован в программной среде Mathcad 14.0.

6. Уточнение геометрических размеров магнитной системы комбинированного генератора осуществляется посредством двухмерной конечно-элементной модели ВПЭГ продольного и поперечного типа, построенных в программной среде ELCUT 5.1. В качестве примера рассмотрим двумерную конечно-элементную модель одноименнополюсного ВПЭГ продольного типа [7, рис. 1], которая представлена на рис. 7 при различном ходе подвижной части генератора.

Уточнение геометрических размеров магнитной системы генератора осуществляется посредством расчета интегральной физической величины – потокосцепления на один виток рабочей обмотки. Расчетное (на основе алгоритма, см. рис. 2) и экспериментальное (на основе двумерной конечно-элементной модели) средние значения потокосцепления на один виток рабочей обмотки

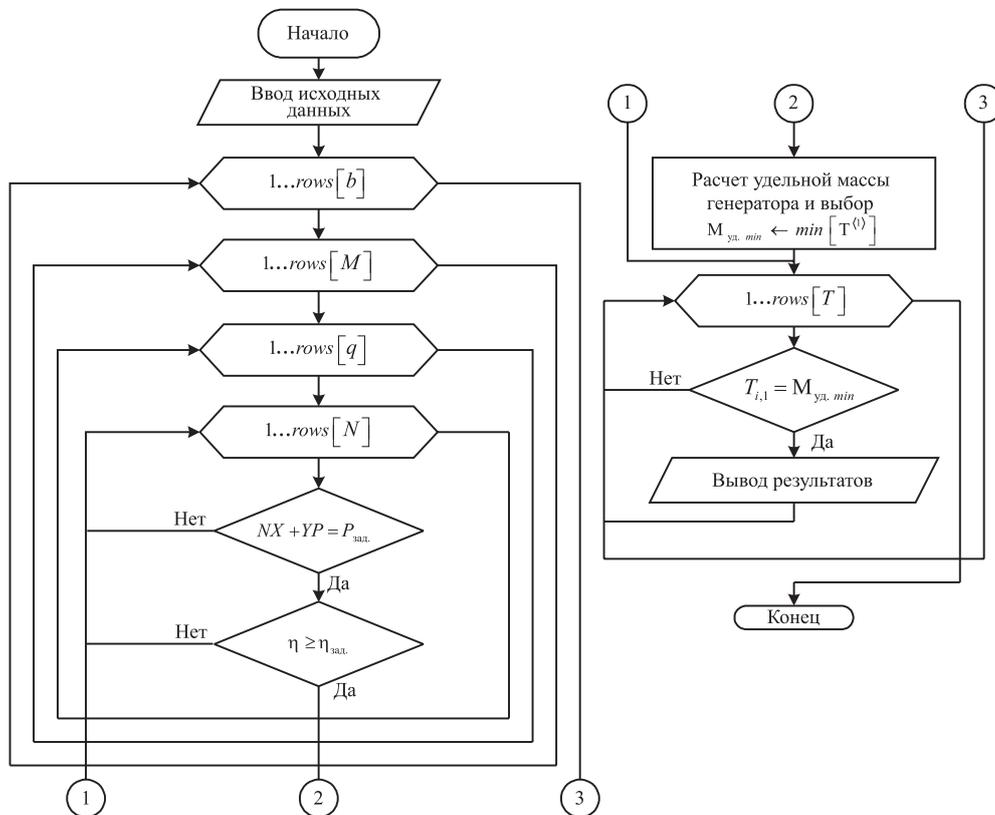


Рис. 6. Блок-схема алгоритма структурного синтеза комбинированного генератора возвратно-поступательного типа по критерию «минимум удельной массы»

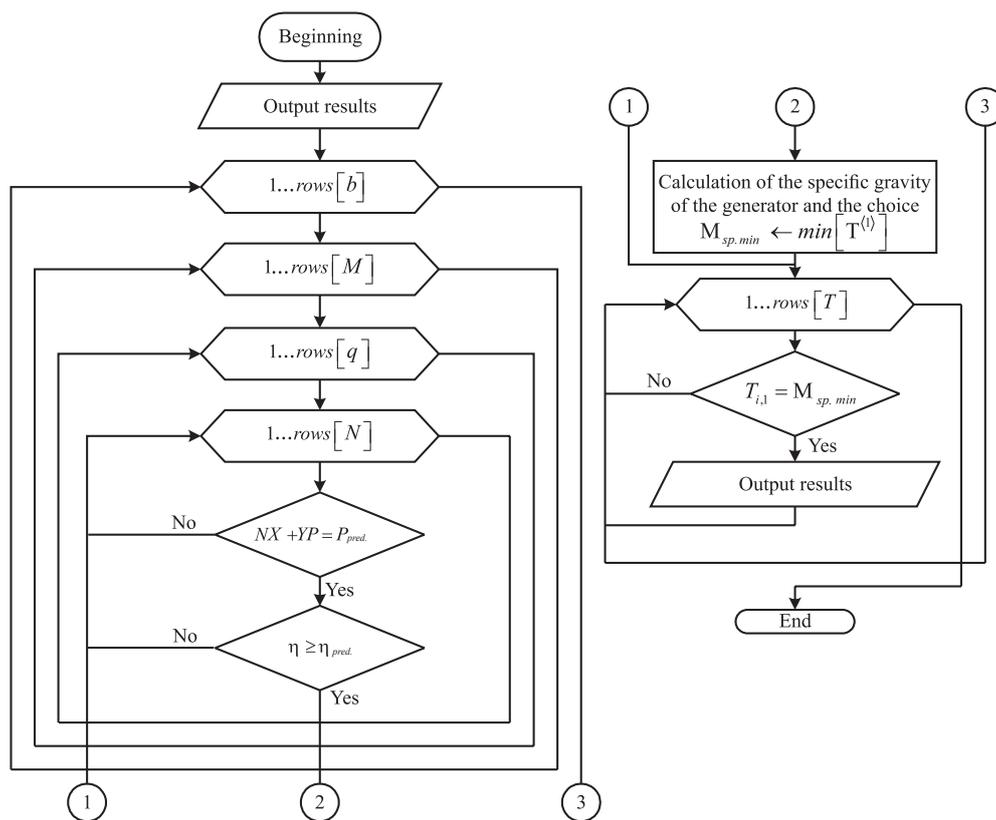


Fig. 6. Block diagram of the algorithm of structural synthesis of the combined generator of a reciprocating type according to the criterion of “minimum specific gravity”

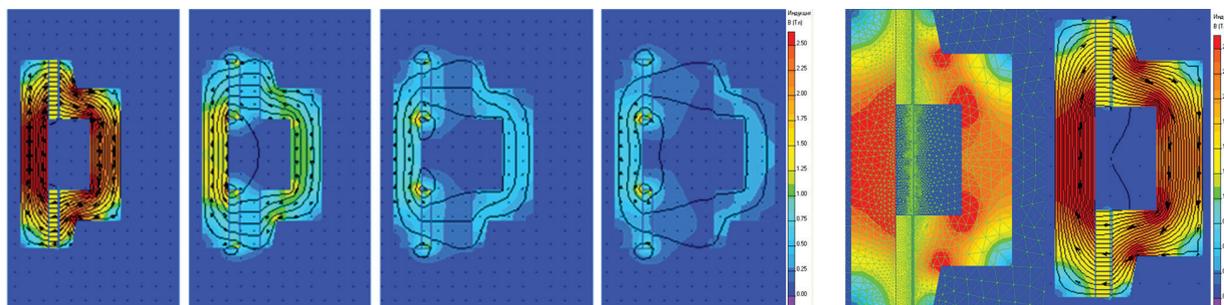


Рис. 7. Двумерная конечно-элементная модель одноименнополюсного ВПЭГ продольного типа

Fig. 7. Two-dimensional finite element model of same-name-pole reciprocating electric generator of longitudinal type

генератора соответственно равно $4,5 \cdot 10^{-3}$ Вб и $4,7 \cdot 10^{-3}$ Вб. Сравнение экспериментальных и расчетных значений показывает, что алгоритм (см. рис. 2) с достаточной точностью описывает последовательность расчетов электромагнитных процессов в генераторе. Погрешность расчетов связана с наличием в магнитной цепи генератора потоков рассеяния и выпучивания, учесть которые в полном объеме достаточно трудно.

Исследование распределения магнитного поля в магнитной системе одноименнополюсного ВПЭГ продольного типа на двумерной конечно-элементной модели, представленной на рис. 8, позволило выявить наиболее насыщенные участки магнитопровода, а также участки, характеризующиеся низкими значениями напряженности магнитного поля, обозначенные на рис. 8 цифрами 1 и 2 соответственно. С целью лучшего использования электротехнической стали магнитопровода уточнены геометрические размеры и форма зубцово-пазовой зоны магнитной системы генератора, что позволило уменьшить массу генератора на 7–10 % по сравнению с первоначальной конструкцией. Магнитная система одноименнополюсного ВПЭГ продольного типа после уточнения геометрических размеров представлена на рис. 9.

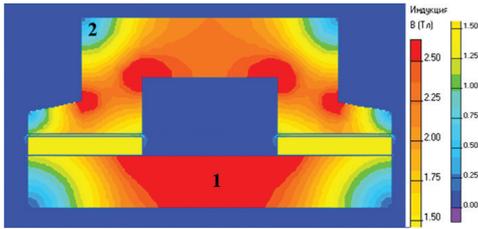


Рис. 8. Картина распределения магнитного поля одноименнополюсного ВПЭГ продольного типа
 Fig. 8. Pattern of distribution of the magnetic field of same-name-pole reciprocating electric generator of longitudinal type

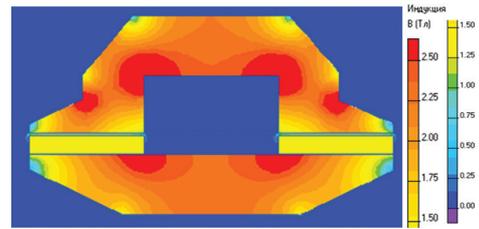


Рис. 9. Магнитная система одноименнополюсного ВПЭГ продольного типа после уточнения геометрических параметров
 Fig. 9. Magnetic system of same-name-pole reciprocating electric generator of longitudinal type after verification of geometrical parameters

В табл. 5 отражены результаты решения задачи структурно-параметрического синтеза комбинированного генератора с параллельной схемой включения генераторов продольного и поперечного типа для энергоустановки на базе СПД. Исходные данные представлены в табл. 4 и на рис. 10. Полученная в результате синтеза модульная структура комбинированного генератора с параллельной схемой включения генераторов продольного и поперечного типа отражены на рис. 11.

Таблица 4. Исходные данные для структурно-параметрического синтеза комбинированного генератора возвратно-поступательного типа

Table 4. Input data for structural-parametric synthesis of combined reciprocating generator

Наименование заданного параметра	Значение параметра
Рабочая частота СПД, Гц	100
Рабочий ход поршня СПД, мм	35
Потребляемая активная электрическая мощность, кВт	12
Номинальное напряжение, В	220
Коэффициент мощности	0,95–1
Перегрузка	2

Проведем сравнительную оценку по КПД и удельной массе энергоустановки на базе СПД и комбинированного генератора с современными зарубежными энергоустановками на базе СПД и ВПЭГ поперечного типа [14], а также двигателя внутреннего сгорания с кривошипно-шатунным механизмом и генератором вращательного типа [15, 16].

Выражение для расчета удельной массы энергоустановки имеет вид [7]

$$m_{уд. \text{ эу}} = ((1 \div 1,25)P_d m_{уд. д} + P_g m_{уд. г}) / P_g, \tag{4}$$

где P_d, P_g – номинальная мощность двигателя и генератора соответственно; $m_{уд.д}, m_{уд.г}$ – удельная масса двигателя и генератора соответственно.

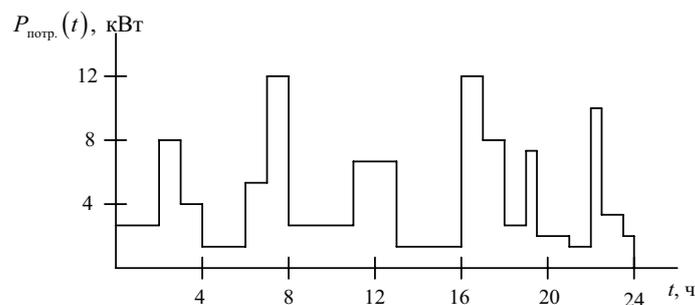


Рис. 10. График потребляемой нагрузки
 Fig. 10. Schedule of consumed load

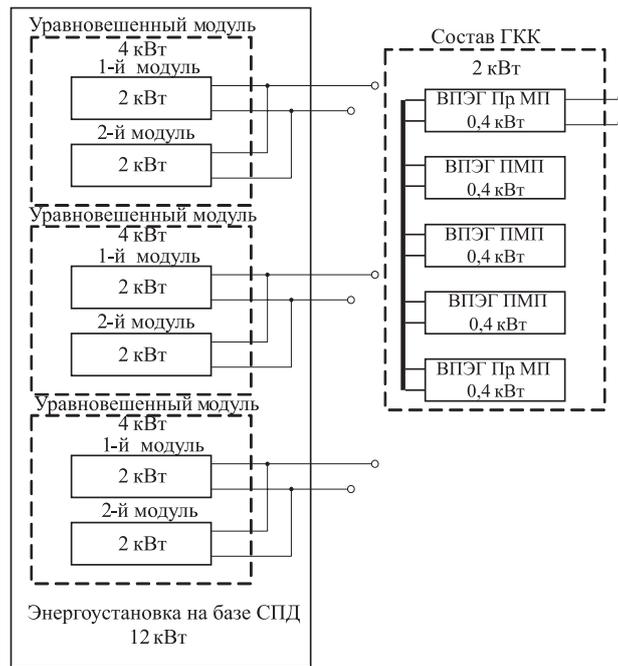


Рис. 11. Модульная структура синтезируемого комбинированного генератора с параллельной схемой включения

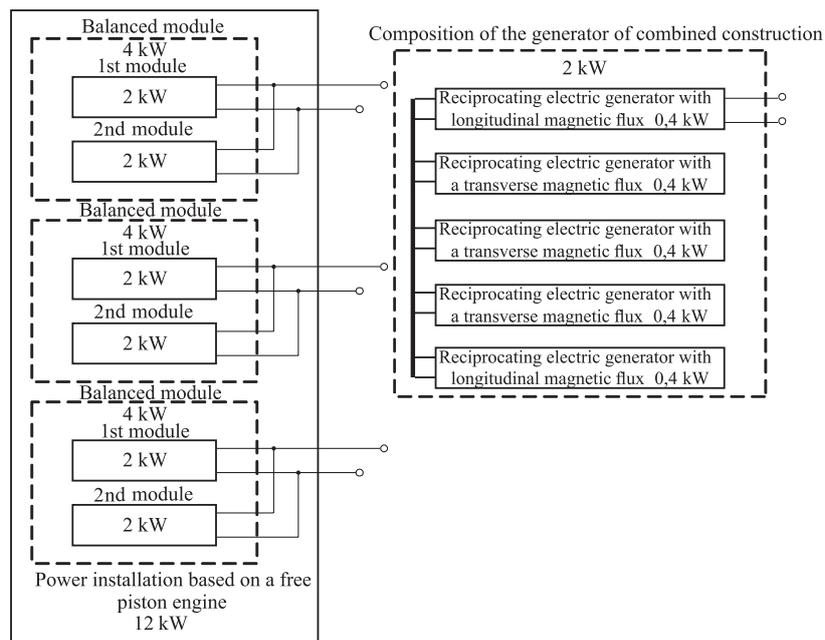


Fig. 11. Modular structure of the synthesized combined generator with parallel switching circuit

Общий КПД энергоустановки определяется по формуле [4]

$$\eta_o = \eta_d \eta_{эл.} 100 \%, \quad (5)$$

где η_d – КПД двигателя энергоустановки, $\eta_{эл.}$ – КПД электрогенератора.

С учетом результатов решения задачи структурно-параметрического синтеза комбинированного генератора (табл. 5) и выражений (4) и (5) разность между КПД и отношение удельной массы составляют:

энергоустановки на базе комбинированного генератора и современных зарубежных энергоустановок на базе СПД и ВПЭГ поперечного типа

$$\eta_{\circ \text{ СПД с ГКК}} - \eta_{\circ \text{ СПД с ВПЭГ}} = 1,2 - 1,6 \%, \quad \frac{m_{\text{уд. эу. СПД с ВПЭГ}}}{m_{\text{уд. эу. СПД с ГКК}}} = 1,25 - 1,29;$$

энергоустановки на базе комбинированного генератора и современных зарубежных энергоустановок на базе двигателя внутреннего сгорания с кривошипно-шатунным механизмом и генератором вращательного типа

$$\eta_{\circ \text{ ДВС с КШМ}} - \eta_{\circ \text{ СПД с ВПЭГ}} = 8,5 - 18,5 \%, \quad \frac{m_{\text{уд. эу. ДВС с КШМ}}}{m_{\text{уд. эу. СПД с ГКК}}} = 1,29 - 4,6.$$

Таблица 5. Результаты решения задачи структурно-параметрического синтеза

Table 5. Results of solving the problem of structurally-parametric synthesis

Параметр	Тип ВПЭГ	
	продольный	поперечный
M, N	2	3
$P_{\text{вых.}}, \text{ кВт}$	0,8	1,2
$m_{\text{уд.}}, \text{ кг/кВт}$	1,7	1,65
<i>Комбинированный генератор</i>		
$P_{\text{вых.}}, \text{ кВт}$	2	
$m_{\text{уд.}}, \text{ кг/кВт}$	1,67	
$\eta, \%$	93,5	
<i>Уравновешенный модуль</i>		
$P_{\text{вых.}}, \text{ кВт}$	4	
$m_{\text{уд.}}, \text{ кг/кВт}$	1,67	
$\eta, \%$	93,5	
<i>Модульная структура</i>		
$P_{\text{вых.}}, \text{ кВт}$	12	
$m_{\text{уд.}}, \text{ кг/кВт}$	1,67	

Таким образом, применение в энергоустановках на базе СПД возвратно-поступательного генератора с комбинированным приращением магнитных потоков в разных магнитопроводах позволяет:

при повышении КПД на 1,2–1,6 % уменьшить удельную массу энергоустановки в 1,25–1,29 раза по сравнению с современными зарубежными энергоустановками на базе СПД и ВПЭГ поперечного типа;

при повышении КПД на 8,5–18,5 % уменьшить удельную массу энергоустановки в 1,29–4,6 раза по сравнению с современными зарубежными энергоустановками на базе двигателя внутреннего сгорания с кривошипно-шатунным механизмом и генератором вращательного типа.

Заключение. Полученные результаты дают основание утверждать, что разработанная методика структурно-параметрического синтеза комбинированного генератора возвратно-поступательного типа для энергоустановки на базе СПД, отличающаяся использованием удельной массы комбинированного генератора в качестве целевой функции, позволяет синтезировать комбинированный генератор. Его применение в энергоустановке на базе СПД при повышении КПД до 1,6 % позволяет уменьшить удельную массу энергоустановки до 28,6 % по сравнению с современными аналогами (ВПЭГ поперечного типа); при повышении КПД до 18,5 % дает возможность уменьшить удельную массу энергоустановки не менее чем в 1,29 раза по сравнению с современными энергоустановками на базе ДВС с КШМ и генератором вращательного типа.

Список использованных источников

1. Отвага: военно-патриотический сайт Российской Федерации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.otvaga2004.ru/na-zemle/na-zemle-11/modern_land_robots_1/ – Дата доступа: 28.10.2017.
2. Пинский, Ф. И. Энергоустановки со свободнопоршневыми двигатель-генераторами / Ф. И. Пинский // Бортовая энергетика. – 2004. – № 2. – С. 13–17.
3. Cawthorne, W. R. Optimization of a Brushless Permanent Magnet Linear Alternator for Use with a Linear Internal Combustion Engine / W. R. Cawthorne. – Morgantown, 1999. – 113 p.
4. Темнов, Э. С. Разработка теоретических основ расчета и конструирования малоразмерных двигатель-генераторных установок как единой динамической системы: дис. ... канд. техн. наук / Э. С. Темнов. – Тула, 2005. – 134 л.
5. Использование возвратно-поступательной схемы электрического генератора для повышения эффективности энергоустановок автономных образцов вооружения / А. Б. Менжинский [и др.] // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2016. – № 4 (53). – С. 108–114.
6. Применение короткоходовой схемы возвратно-поступательного электрического генератора для повышения механического КПД и эффективной мощности энергоустановок на базе свободнопоршневых двигателей / А. Б. Менжинский [и др.] // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2017. – № 1 (54). – С. 101–108.
7. Применение возвратно-поступательного генератора комбинированной конструкции для повышения КПД и уменьшения удельной массы энергоустановок автономных образцов вооружения / А. Б. Менжинский [и др.] // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2017. – № 4 (57). – С. 62–72.
8. Хитерер, М. Я. Синхронные электрические машины возвратно-поступательного движения / М. Я. Хитерер, И. Е. Овчинников. – СПб.: КОРОНА-принт, 2013. – 368 с.
9. Вольдек, А. И. Электрические машины / А. И. Вольдек. – 2-е изд., испр. и доп. – Л.: Энергия, 1974. – 840 с.
10. Балагуров, В. А. Проектирование специальных машин переменного тока / В. А. Балагуров. – М.: Высш. шк., 1982. – 272 с.
11. Балагуров, В. А. Электрические генераторы с постоянными магнитами / В. А. Балагуров, Ф. Ф. Галтеев. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.
12. Влияние исходных данных проектирования на оптимальные в симметричной двухкатушечной П-образной клапанной магнитной системе с цилиндрическими сердечниками и полюсными наконечниками / О. А. Никитина [и др.] // Вест. Чуваш. ун-та. – 2015. – № 1. – С. 81–90.
13. Абрамов, О. В. Методы и алгоритмы параметрического синтеза стохастических систем / О. В. Абрамов // Проблемы управления. – 2006. – № 4. – С. 3–8.
14. Линейный генератор с постоянными магнитами для систем электропитания автономных объектов / В. Е. Высоккий [и др.] // Изв. высш. учеб. заведений. Электромеханика. – 2010. – № 1 – С. 80–82.
15. Голубцов, С. Г. Электроснабжение узлов связи: учеб. пособие / С. Г. Голубцов, В. М. Калинин, Г. А. Леонович. – Минск: Воен. акад. Респ. Беларусь, 2016. – 176 с.
16. БМЕ-дизель [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.bme-diesel.ru. – Дата доступа: 19.01.2018.

References

1. Military-patriotic site of “Courage” of the Russian Federation. Available at: http://www.otvaga2004.ru/na-zemle/na-zemle-11/modern_land_robots_1/ (Accessed 28 October 2017) (in Russian).
2. Pinskiy F. I. Power plants with free piston engine generators. *Mobil'naya Tekhnika* [Mobile Technology], 2004, no. 2, pp. 13–17 (in Russian).
3. Cawthorne W. R. *Optimization of a Brushless Permanent Magnet Linear Alternator for Use with a Linear Internal Combustion Engine*. Morgantown, 1999. 113 p.
4. 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).
5. Menzhinskii A. B., Malashin A. N., Kaleda A. E., Sidyako O. V. Using the reciprocating scheme of an electric generator to increase the efficiency of power plants of autonomous weapons. *Vestnik Voennoi akademii Respubliki Belarus' = Bulletin of the Military Academy of the Republic of Belarus*, 2016, no. 4 (53), pp. 108–114 (in Russian).
6. Menzhinskii A. B., Malashin A. N., Kaleda A. E., Kolchin E. V. The use of a short-circuit scheme of a reciprocating electric generator to increase the mechanical efficiency and effective power of power plants based on free piston engines. *Vestnik Voennoi akademii Respubliki Belarus' = Bulletin of the Military Academy of the Republic of Belarus*, 2017, no. 1 (54), pp. 101–108 (in Russian).
7. Menzhinskii A. B., Malashin A. N., Mityanov I. V. The use of a reciprocating generator of a combined design to increase the efficiency and reduce the specific weight of power plants of autonomous weapons. *Vestnik Voennoi akademii Respubliki Belarus' = Bulletin of the Military Academy of the Republic of Belarus*, 2017, no. 4 (57), pp. 62–72 (in Russian).
8. Khiterer M. Ya., Ovchinnikov I. E. *Synchronous electric reciprocating machines*. Saint Petersburg, KORONA-print Publ., 2013. 368 p. (in Russian).
9. Vol'dek A. I. *Electric cars*. 2 ed. Leningrad, Energy Publ., 1974. 840 p. (in Russian).
10. Balagurov V. A. *Design of special machines for alternating current*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1982. 272 p. (in Russian).
11. Balagurov V. A., Galteev F. F. *Elektricheskie generatory s postoyannymi magnitami*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 280 p. (in Russian).

12. Nikitina O. A., Petrov O. A., Russova N. V., Savin M. L., Svintsov G. P. Influence of initial design data on the optimal in a symmetrical two-coil P-shaped valve system with cylindrical cores and pole pieces. *Vestnik Chuvashskogo universiteta = Bulletin of the Chuvash University*, 2015, no. 1, pp. 81–90 (in Russian).

13. Abramov O. V. Methods and algorithms for the parametric synthesis of stochastic systems. *Problemy upravleniya*, 2006, no. 4, pp. 3–8 (in Russian).

14. Vysotskii V. E., Tarashev S. A., Sinitsin A. P. Linear generator with permanent magnets for power systems of autonomous objects. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika = Russian Electromechanics*, 2010, no. 1, pp. 80–82 (in Russian).

15. Golubtsov S. G., Kalinin V. M., Leonovich G. A. *Power supply of communication centers*. Minsk, Military Academy of the Republic of Belarus Publ., 2016. 176 p. (in Russian).

16. *BME-dizel'*. Available at: www.bme-diesel.ru. (Accessed 19 January 2018) (in Russian).

Информация об авторах

Менжинский Андрей Борисович – адъюнкт (аспирант), кафедра 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)

Information about the authors

Andrei B. Menzhinsky – Postgraduate Student, Chair of electrical equipment and power supply systems, Military Academy of Republic of Belarus (220, Nezavisimosti Ave., 220057, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: volna05011990@mail.ru

Andrey N. Malashin – Ph. D. (Engineering), Assistant Professor, Professor of the Chair of electrical equipment and power supply systems, Military Academy of Republic of Belarus (220, Nezavisimosti Ave., 220057, Minsk, Republic of Belarus).