

**А. Б. Менжинский**

*Военная академия Республики Беларусь, Минск, Беларусь*

## **СОГЛАСОВАНИЕ СИЛ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПОДСИСТЕМ ЭНЕРГОУСТАНОВКИ СО СВОБОДНОПОРШНЕВЫМ ДВИГАТЕЛЕМ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ГЕНЕРАТОРОМ ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ТИПА**

**Аннотация.** Автономная система энергоснабжения современных мобильных средств специального назначения требует разработки электромеханических преобразователей энергии с высокими энергетическими и минимальными массогабаритными показателями. В промышленно развитых странах в качестве перспективной энергоустановки рассматривается система «свободнопоршневой двигатель – возвратно-поступательный электрический генератор поперечного типа».

Главной особенностью такой энергоустановки является отсутствие кривошипно-шатунного механизма в конструкции двигателя. Это позволяет: увеличить коэффициент полезного действия двигателя до 50–60 % и габаритную мощность в 2,5–3 раза с одновременным уменьшением удельной массы и металлоемкости по сравнению с традиционными двигателями; снизить удельный расход топлива двигателя до 30 %; увеличить ресурс до капитального ремонта на 30–50 тыс. ч; реализовать модульную структуру.

Основными недостатками такой энергоустановки являются большая вероятность поломки при пропуске зажигания рабочей смеси и неустойчивость работы при значительных колебаниях нагрузки. Отмеченные недостатки обусловлены несогласованностью сил электрической и механической подсистем энергоустановки на всем рабочем цикле. Особую сложность вызывает решение задачи согласования сил электрической и механической подсистем энергоустановки в крайних положениях поршневой группы свободнопоршневого двигателя. В связи с этим был разработан способ решения задачи согласования сил механической и электрической подсистем энергоустановки со свободнопоршневым двигателем на всем рабочем цикле, отличающийся использованием в электрической подсистеме энергоустановки электромеханического преобразователя энергии возвратно-поступательного типа с поперечным и продольным нелинейным изменением магнитного потока. Согласование сил механической и электрической подсистем энергоустановки на всем рабочем цикле позволяет обеспечить выполнение условия непрерывного электромеханического преобразования энергии на всем рабочем цикле и уменьшить удельную массу электрической подсистемы энергоустановки при одновременном повышении коэффициента полезного действия.

**Ключевые слова:** электромагнитная сила, энергоустановка, комбинированный генератор, возвратно-поступательный электрический генератор, свободнопоршневой двигатель

**Для цитирования:** Менжинский, А. Б. Согласование сил механической и электрической подсистем энергоустановки со свободнопоршневым двигателем и электрическим генератором возвратно-поступательного типа / А. Б. Менжинский // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2019. – Т. 64, №3. – С. 304–320. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-3-304-320>

**A. B. Menzhinski**

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

## **COORDINATION OF FORCES OF MECHANICAL AND ELECTRIC SUBSYSTEMS OF POWER PLANT WITH FREE PISTON ENGINE AND ELECTRIC GENERATOR OF RECIPROCATING TYPE**

**Abstract.** Autonomous power supply system of modern mobile special-purpose equipment requires the development of electromechanical energy converters with high energy and minimum weight- and size indicators. In industrialized countries, the system “free piston engine – reciprocating electric generator of transverse type” is considered as a promising power plant.

The main feature of this kind of power plant is the lack of crank mechanism in the engine design. This allows: increasing the efficiency of the engine up to 50–60 % and overall power by 2.5–3 times while reducing the specific gravity and metal consumption compared to traditional engines; reducing the specific fuel consumption of the engine up to 30 %; increasing the resource to overhaul by 30–50 thousand hours; implementing a modular structure.

The main drawbacks of this kind of power plant are high probability of failure when passing the ignition of the working mixture and instability of work with significant load fluctuations. The noted drawbacks are due to the inconsistency of the forces of the electrical and mechanical subsystems of the power plant throughout the operating cycle. The solution for the

problem of matching the forces of the electrical and mechanical subsystems of the power plant in the extreme positions of the piston group of the free piston engine is of particular complexity. In this regard, a method for solving the problem of matching the forces of the mechanical and electrical subsystems of the power plant with a free-piston engine throughout the operating cycle was developed, characterized by the use of an electromechanical reciprocating energy converter with transverse- and longitudinal nonlinear changes in the magnetic flux in the electrical subsystem. Coordination of the forces of mechanical and electrical subsystems of the power plant on the entire operating cycle makes it possible to fulfill the conditions of continuous electromechanical energy conversion at all work cycle and to reduce the specific gravity of the electrical subsystems of the plant while improving efficiency.

**Keywords:** electromagnetic force, power plant, combined generator, reciprocating electric generator, free piston engine

**For citation:** Menzhinski A. B. Coordination of forces of mechanical and electric subsystems of power plant with free piston engine and electric generator of reciprocating type. *Vesti Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seriya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2019, vol. 64, no. 3, pp. 304–320 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-3-304-320>

**Введение.** Автономная система энергоснабжения (АСЭС) современных мобильных средств специального назначения требует разработки электромеханических преобразователей энергии с высокими энергетическими и минимальными массогабаритными показателями (отчет о НИР №566358 «Технический облик перспективной системы энергоснабжения полевых и мобильных узлов связи» (Минск, 2018)). В промышленно развитых странах (США, Россия, Великобритания, Япония, Германия, Швеция, Нидерланды, Китай, Израиль и др.) в качестве перспективной энергоустановки рассматривается система «свободнопоршневой двигатель (СПД) – линейный электрический генератор (возвратно-поступательный электрический генератор (ВПЭГ) поперечного типа)» (рис. 1) [1–12].

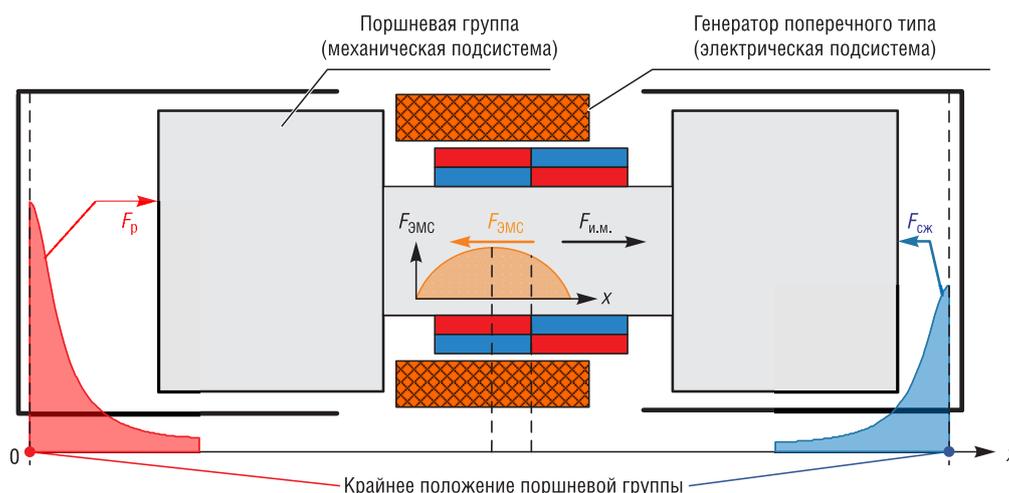


Рис. 1. Свободнопоршневой двигатель с возвратно-поступательным электрическим генератором поперечного типа

Fig. 1. Free-piston engine with reciprocating electric generator transverse type

Главной особенностью энергоустановки с СПД и ВПЭГ поперечного типа является отсутствие кривошипно-шатунного механизма (КШМ) в конструкции двигателя. Это позволяет [1, 3]: увеличить коэффициент полезного действия (КПД) двигателя до 50–60 % и габаритную мощность в 2,5–3 раза с одновременным уменьшением удельной массы и металлоемкости СПД по сравнению с традиционными двигателями; снизить удельный расход топлива двигателя до 30 %; увеличить ресурс до капитального ремонта на 30–50 тыс. ч; реализовать модульную структуру энергоустановки.

Основными недостатками рассматриваемой энергоустановки являются большая вероятность поломки при пропуске зажигания рабочей смеси и неустойчивость работы при значительных колебаниях нагрузки [3, 11]. Отмеченные недостатки обусловлены несогласованностью сил электрической (генератор) и механической (двигатель) подсистем энергоустановки на всем рабочем цикле.

Обобщение научной литературы [3–5, 12], посвященной исследованию энергоустановок с СПД и ВПЭГ поперечного типа, показало, что в настоящее время предпринимаются попытки решения задачи согласования сил электрической и механической подсистем энергоустановки

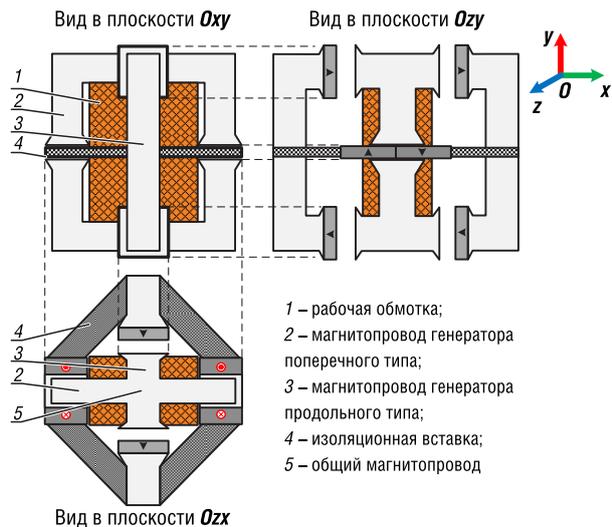


Рис. 2. Структура комбинированного генератора с Ж-образным магнитопроводом

Fig. 2. The structure of the combined generator with a J-shaped magnetic core

энергоустановки на всем рабочем цикле, и тем самым обеспечить согласование электрической и механической подсистем энергоустановки, что при пропуске зажигания рабочей смеси может привести к аварийной ситуации и поломке энергоустановки. С учетом сказанного решение задачи согласования сил электрической и механической подсистем энергоустановки с СПД на всем рабочем цикле, особенно в крайних положениях поршневой группы СПД, представляет особую актуальность.

**Способ решения задачи согласования сил механической и электрической подсистем энергоустановки.** С этой целью в данной статье предлагается рассмотреть электромеханический преобразователь энергии (ЭМПЭ) возвратно-поступательного типа с поперечным и продольным нелинейным изменением магнитного потока (комбинированный ЭМПЭ возвратно-поступательного типа) [13, 15]. В качестве примера на рис. 2 представлен вариант структуры разработанного мною комбинированного генератора (КГ) возвратно-поступательного типа с Ж-образным магнитопроводом (МПр).

В целях обоснования возможности применения ЭМПЭ возвратно-поступательного типа с продольным нелинейным изменением магнитного потока в энергоустановке с СПД проведен анализ временных диаграмм координаты подвижной части, потока сцепления с рабочей обмоткой  $\hat{\Psi}_{\delta_0}$  и электродвижущей силы (ЭДС) движения на один виток рабочей обмотки  $\hat{E}$  генератора продольного типа, которые в нормированном виде представлены на рис. 3.

Из рис. 3, с видно, что при приближении подвижной части генератора к неподвижной  $x_{\text{ВПЭГ}}^{**} \rightarrow \delta_{\min}$  (минимальная величина воздушного зазора) в рабочей обмотке генератора формируется ЭДС движения отрицательной полярности, а при удалении подвижной части генератора  $x_{\text{ВПЭГ}}^{**} \rightarrow \delta_{\max}$  (максимальная величина воздушного зазора) – ЭДС движения положительной полярности. Это приводит к формированию в рабочей обмотке генератора разнополярного тока. При  $x_{\text{ВПЭГ}}^{**} \rightarrow \delta_{\min}$  и  $x_{\text{ВПЭГ}}^{**} \rightarrow \delta_{\max}$  ток в рабочей обмотке направлен таким образом, что созданное им магнитное поле противодействует изменению внешнего магнитного поля, в данном случае магнитного поля постоянного магнита (ПМ) (см. рис. 3, b), которым создан этот ток. В результате этого при  $x_{\text{ВПЭГ}}^{**} \rightarrow \delta_{\min}$  и  $x_{\text{ВПЭГ}}^{**} \rightarrow \delta_{\max}$  будут формироваться разнополярные силы, действующие на подвижную часть генератора [13]. Резко возрастающий и убывающий характер ЭДС движения вблизи точки  $\delta_{\min}$ , а затем стремящийся к нулю (см. рис. 3, c), обусловлен характером изменения составляющих ЭДС движения  $d\hat{\Psi}_{\delta_0}/dx_{\text{ВПЭГ}}^{**}$  и  $dx_{\text{ВПЭГ}}^{**}/dt$ . При  $x_{\text{ВПЭГ}}^{**} \rightarrow \delta_{\min}$  происходит уменьшение составляющей  $dx_{\text{ВПЭГ}}^{**}/dt$  и увеличение  $d\hat{\Psi}_{\delta_0}/dx_{\text{ВПЭГ}}^{**}$ , что говорит об эффективной работе возвратно-поступательного ЭМПЭ

с СПД и ВПЭГ поперечного типа за счет управления механической и электрической подсистемами энергоустановки. Особую сложность вызывает решение задачи согласования сил электрической и механической подсистем энергоустановки в крайних положениях поршневой группы СПД (см. рис. 1). Сложность решения этой задачи связана с тем, что электромагнитная сила (ЭМС) ( $F_{\text{ЭМС}}$ ) ВПЭГ поперечного типа достигает максимального значения в средней точке рабочего цикла СПД, а минимального – в крайних точках [13, 14]. В то же время движущая сила ( $F_d$ ) СПД (сила давления газов на поршень в цилиндре ( $F_p$ ,  $F_{\text{сж}}$ ) и сила инерции масс подвижной части энергоустановки ( $F_{\text{и.м}}$ )) принимает максимальное значение в крайних положениях поршневой группы СПД [13]. Таким образом, ВПЭГ поперечного типа не способен сформировать ЭМС, действующую на механическую подсистему

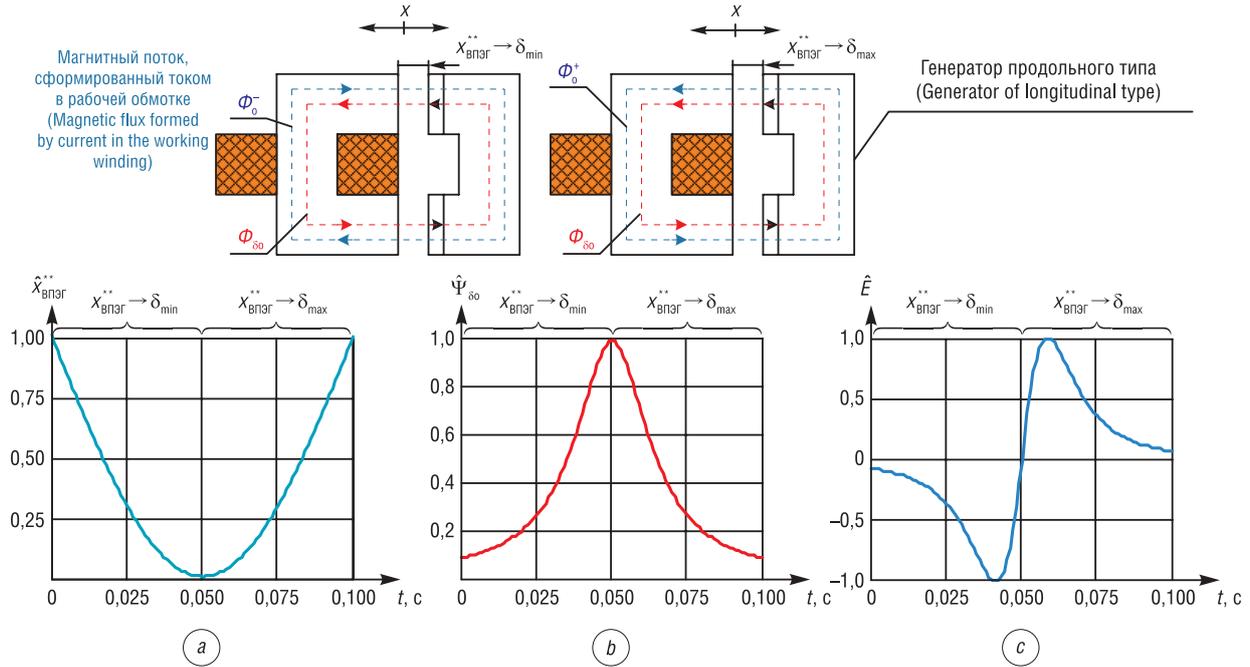


Рис. 3. Временные диаграммы: а – координаты подвижной части генератора; б – потокосцепления с рабочей обмоткой; в – ЭДС движения генератора продольного типа  
 Fig. 3. Timing diagram: а – coordinates of the moving part of the generator; б – the flux linkage with the working winding; в – electromotive force of movement of the generator of longitudinal type

продольного типа в крайних положениях рабочего цикла СПД и возможности использования его в качестве электрической машины в энергоустановке с СПД. В связи с этим решение задачи согласования сил механической и электрической подсистем энергоустановки с СПД на всем рабочем цикле будет основано на использовании в электрической подсистеме энергоустановки комбинированного ЭМПЭ возвратно-поступательного типа. Структурная схема механотронного модуля на базе СПД и комбинированного ЭМПЭ возвратно-поступательного типа представлена на рис. 4.

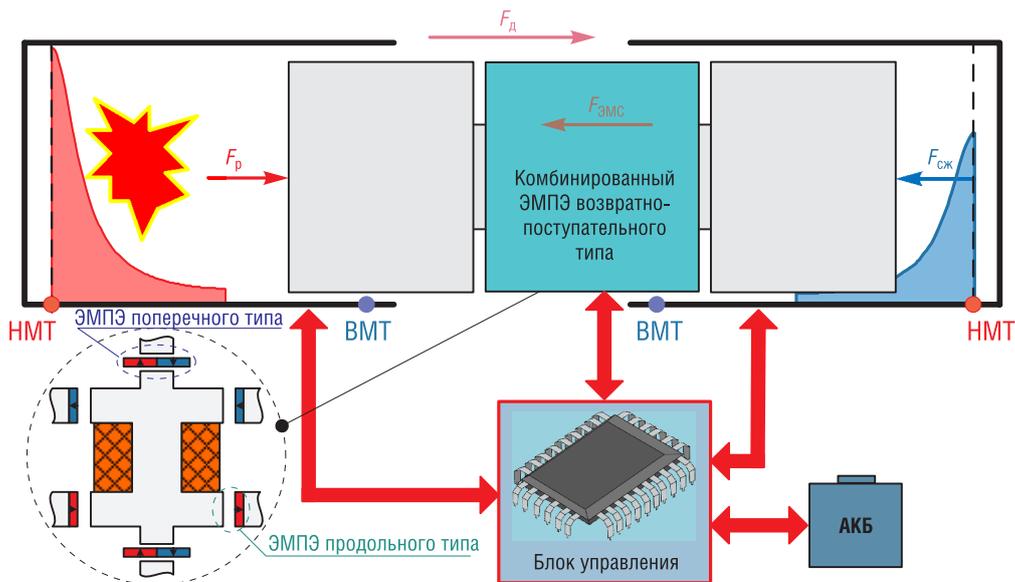


Рис. 4. Структурная схема механотронного модуля на базе СПД и комбинированного ЭМПЭ возвратно-поступательного типа  
 Fig. 4. Block diagram of an mechatronic module based on a free piston engine and a combined electromechanical reciprocating energy converter

С целью исследования величины и характера изменения ЭМС, действующей на поршневую группу СПД, разработаны математические модели (ММ) электрической подсистемы энергоустановки для расчета мгновенной ЭМС [13]:

1) для ВПЭГ поперечного типа:

$$F = 2F_M i_k w_k \mu_0 l_{\text{ПМ}} k \sigma^{-1} / (h_{\text{ПМ}} \mu_0 \mu_r^{-1} + 2\delta), \quad (1)$$

где  $F_M$  – магнитодвижущая сила ПМ;  $i_k$  – ток  $k$ -го контура;  $w_k$  – количество витков  $k$ -го контура;  $\mu_0$  – абсолютная магнитная проницаемость вакуума;  $l_{\text{ПМ}}$  и  $h_{\text{ПМ}}$  – соответственно длина и толщина ПМ;  $k$  и  $\sigma$  – коэффициенты выпучивания и рассеяния магнитного потока в магнитной системе ВПЭГ поперечного типа;  $\mu_r$  – внутренняя проницаемость ПМ;  $\delta$  – величина воздушного зазора;

2) для ВПЭГ продольного типа ЭМС может быть представлена в виде трех составляющих: однополярный 2-полюсный ВПЭГ (ОВПЭГ-2):

$$F_{\text{ОВПЭГ-2}} = \mu_0 S_\delta k' (\sigma')^{-1} [h_{\text{ПМ}} \mu_0 \mu_r^{-1} + \delta_{\min} + (0,5h + x_{\text{ВПЭГ}}^{**})]^{-2} [F_M^2 + 0,25(i_k w_k)^2 + F_M i_k w_k], \quad (2)$$

разнополярный ВПЭГ (РВПЭГ):

$$F_{1.1} = \begin{cases} -F_M^2 \mu_0 S_\delta k' \sigma'^{-1} [h_{\text{ПМ}} \mu_0 \mu_r^{-1} + \delta_{\min} + (0,5h + x_{\text{ВПЭГ}}^{**})]^{-2} & \text{при } x_{\text{ВПЭГ}}^{**} \rightarrow \delta_{\min}; \\ F_M^2 \mu_0 S_\delta k' \sigma'^{-1} [h_{\text{ПМ}} \mu_0 \mu_r^{-1} + \delta_{\min} + (0,5h - x_{\text{ВПЭГ}}^{**})]^{-2} & \text{при } x_{\text{ВПЭГ}}^{**} \rightarrow \delta_{\max}; \end{cases} \quad (3)$$

$$F_{1.2} = \begin{cases} -4^{-1} (i_k w_k)^2 \mu_0 S_\delta k' \sigma'^{-1} [h_{\text{ПМ}} \mu_0 \mu_r^{-1} + \delta_{\min} + (0,5h + x_{\text{ВПЭГ}}^{**})]^{-2} & \text{при } x_{\text{ВПЭГ}}^{**} \rightarrow \delta_{\min}; \\ 4^{-1} (i_k w_k)^2 \mu_0 S_\delta k' \sigma'^{-1} [h_{\text{ПМ}} \mu_0 \mu_r^{-1} + \delta_{\min} + (0,5h - x_{\text{ВПЭГ}}^{**})]^{-2} & \text{при } x_{\text{ВПЭГ}}^{**} \rightarrow \delta_{\max}; \end{cases} \quad (4)$$

$$F_{1.3} = \begin{cases} F_M i_k w_k \mu_0 S_\delta k' \sigma'^{-1} [h_{\text{ПМ}} \mu_0 \mu_r^{-1} + \delta_{\min} + (0,5h + x_{\text{ВПЭГ}}^{**})]^{-2} & \text{при } x_{\text{ВПЭГ}}^{**} \rightarrow \delta_{\min}; \\ F_M i_k w_k \mu_0 S_\delta k' \sigma'^{-1} [h_{\text{ПМ}} \mu_0 \mu_r^{-1} + \delta_{\min} + (0,5h - x_{\text{ВПЭГ}}^{**})]^{-2} & \text{при } x_{\text{ВПЭГ}}^{**} \rightarrow \delta_{\max}, \end{cases} \quad (5)$$

где  $S_\delta$  – площадь поперечного сечения воздушного зазора;  $k'$  и  $\sigma'$  – соответственно коэффициенты выпучивания и рассеяния магнитного потока в магнитной системе ВПЭГ продольного типа;  $h$  – ход подвижной части ВПЭГ продольного типа;  $x_{\text{ВПЭГ}}^{**} = 0,5h \sin(2\pi ft)$  – координата перемещения подвижной части ВПЭГ продольного типа;  $f$  – частота колебаний подвижной части генератора;

3) для ВПЭГ комбинированного типа:

$$F^* = F + F_{1.1} + F_{1.2} + F_{1.3}, \quad (6)$$

где  $F_{1.1}$ ,  $F_{1.2}$ ,  $F_{1.3}$  – ЭМС ВПЭГ продольного типа при  $x_{\text{ВПЭГ}}^{**} \rightarrow \delta_{\min}$  и  $x_{\text{ВПЭГ}}^{**} \rightarrow \delta_{\max}$ .

Полученные составляющие ЭМС (1)–(5) позволяют записать выражение для расчета ЭМС любого ВПЭГ продольного и комбинированного типов.

Для определения тока  $k$ -го контура  $i_k$  использовалась уравнения электрического равновесия для  $k$ -го контура магнитоэлектрических ВПЭГ на основе уравнений Кирхгофа и Пуассона для векторного магнитного потенциала [15]:

$$i_k (R_{0k} + R_n) + L_n di_k / dt + (w_k i_k^{-1} S^{-1} \oint A_{zk[i_k]} dS) di_k / dt + i_k w_k d(i_k^{-1} S^{-1} \oint A_{zk[i_k]} dS) / dt + w_k d(S^{-1} \oint A_{zk[F_{m1} \dots F_{mn}, n \neq k]} dS) / dt = 0, \quad (7)$$

где  $R_{0k}$  и  $R_n$  – соответственно активное сопротивление рабочей обмотки генератора и нагрузки;  $L_n$  – индуктивность нагрузки  $k$ -го контура;  $i_k^{-1} S^{-1} \oint A_{zk[i_k]} dS$  – собственная индуктивность на один виток  $k$ -го контура;  $S^{-1} \oint A_{zk[F_{m1} \dots F_{mn}, n \neq k]} dS$  – потокосцепление на один виток  $k$ -го контура, созданное  $n$ -м ПМ.

Совершенство выражений (1)–(7) представляют собой ММ электрической подсистемы энергоустановки с СПД и ВПЭГ для расчета мгновенной ЭМС, действующей со стороны электрической подсистемы энергоустановки на поршневую группу СПД. Проведенные исследования ММ позволили получить величину и характер изменения составляющих ЭМС генераторов продольного типа (рис. 5). Условия моделирования ЭМС:  $J = 1 \cdot 10^7$  А/м<sup>2</sup> (плотность тока),  $B_{st \max} = 1,8$  Тл (максимальная магнитная индукция в МПр),  $h = 0,02$  м,  $f = 50$  Гц,  $w_k = 500$  шт.,  $S_\delta = 0,0004$  м<sup>2</sup>,  $h_{ПМ} = 0,005$  м,  $I_k = 2,2$  А.

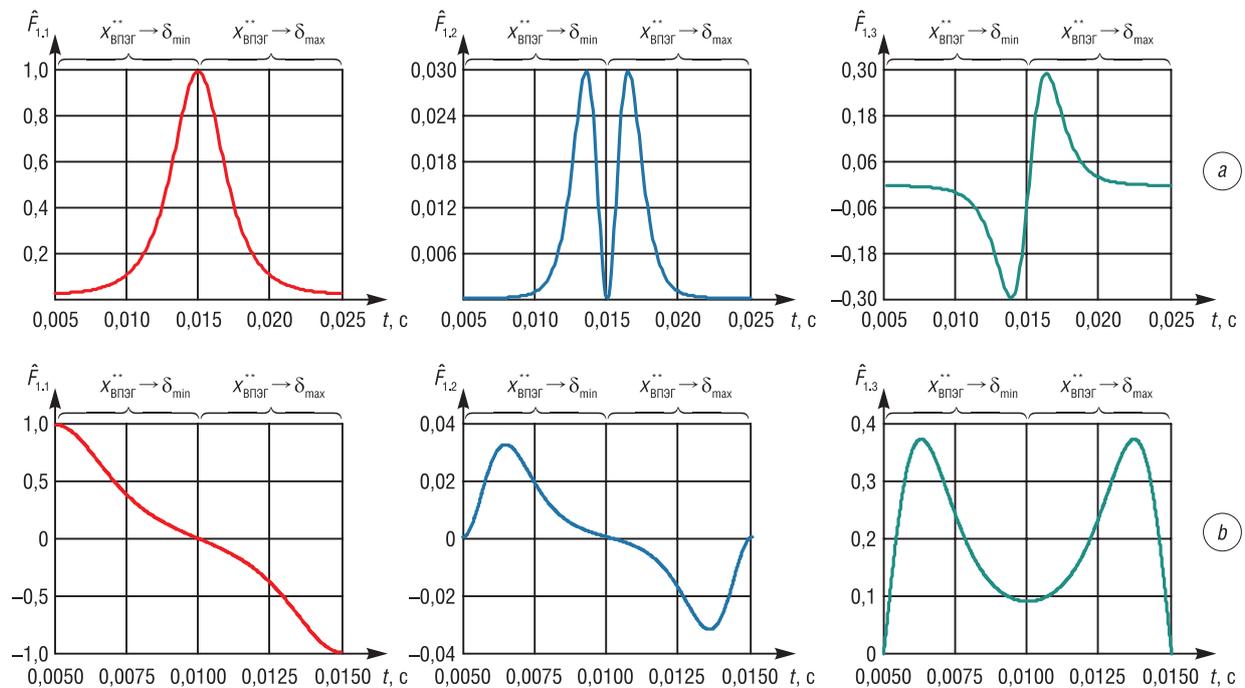


Рис. 5. Временные диаграммы мгновенных значений составляющих ЭМС ВПЭГ: *a* – однополярного 2-полюсного; *b* – разнополярного

Fig. 5. Time diagrams of the instantaneous values of the components of the electromagnetic force of the reciprocating electric generator: *a* – unipolar 2-pole; *b* – bipolar

Временные диаграммы составляющих ЭМС  $F_{1.1}$ ,  $F_{1.2}$ ,  $F_{1.3}$  генераторов продольного типа (см. рис. 5) получены при замыкании генераторов на линейную нагрузку. В результате математического моделирования ВПЭГ продольного типа установлено, что: сила  $F_{1.1}$  зависит от  $F_M$  и  $x_{ВПЭГ}^{**}$ ; сила  $F_{1.2}$  зависит от  $i_k$  и  $x_{ВПЭГ}^{**}$ ; сила  $F_{1.3}$  зависит от  $i_k$ ,  $F_M$  и  $x_{ВПЭГ}^{**}$ .

Составляющая ЭМС  $F_{1.1}$  в процессе преобразования энергии не участвует и является вредной (паразитной) силой. Для ее компенсации предлагается использовать ПМ, размещенные таким образом, что их одноименные полюса обращены друг к другу (рис. 6). Геометрические размеры ПМ выбираются исходя из выполнения условия  $|\hat{F}_{1.1}| = |-\hat{F}_{1.1.к}|$  на всем  $h$ . Аналогичным способом составляющую ЭМС  $F_{1.1}$  можно скомпенсировать и в РВПЭГ. Временные диаграммы составляющих ЭМС в РВПЭГ при скомпенсированной силе  $F_{1.1}$  представлены на рис. 7.

Из рис. 7 видно, что составляющая ЭМС  $F_{1.2}$  значительно меньше составляющей ЭМС  $F_{1.3}$ . В целях более подробного исследования характера действия составляющих  $F_{1.2}$  и  $F_{1.3}$  ЭМС мною был разработан макет однополярного 2-полюсного ВПЭГ продольного типа с ПМ (рис. 8). При создании макета использовалась разработанная универсальная методика электромагнитного расчета ВПЭГ с поперечным и продольным нелинейным изменением магнитного потока.

Макет однополярного 2-полюсного ВПЭГ продольного типа с ПМ состоит из неподвижной части (1) в виде П-образного МПр с обмоткой (2) и подвижной части (3), представляющей собой также П-образный МПр с ПМ (4), блока питания (5) RFT-3712 (max – 10 А), системы охлаждения (вентилятор) (6). Магнитопроводы набраны из листов электротехнической стали марки Э-31 (толщина листа 0,5 мм). Обмотка выполнена из медного изолированного провода. Количество

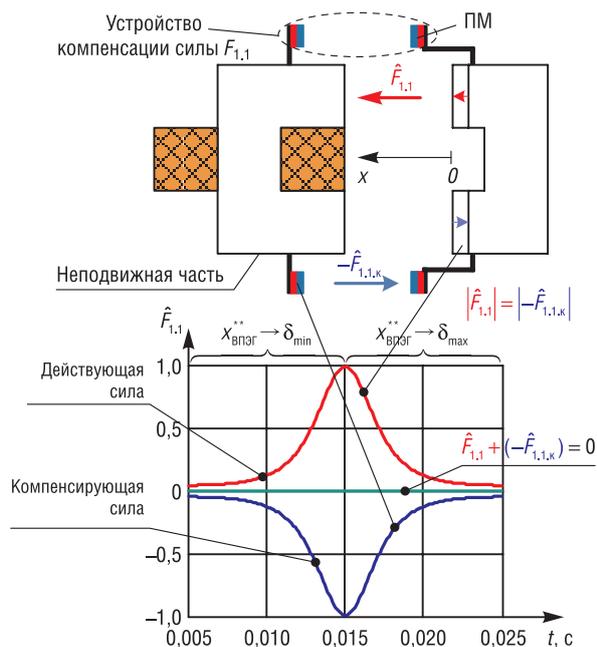


Рис. 6. Временные диаграммы поясняющие способ компенсации силы  $F_{1,1}$  ОВПЭГ-2

Fig. 6. Time diagrams explaining the method of power compensation of  $F_{1,1}$  unipolar 2-pole reciprocating electric generator

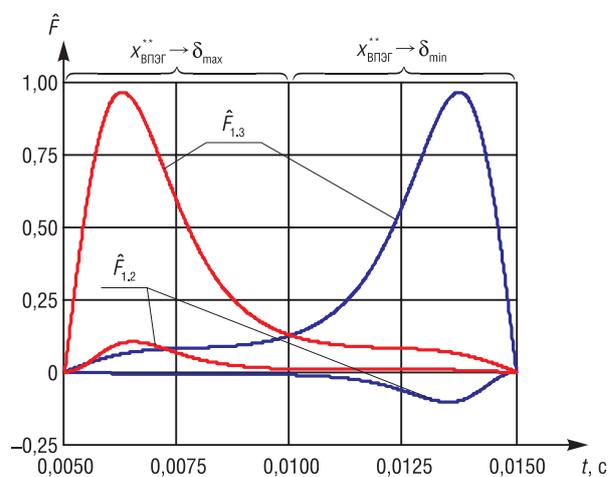


Рис. 7. Временные диаграммы составляющих ЭМС в РВПЭГ при компенсированной силе  $F_{1,1}$

Fig. 7. Timing diagram of the components of the electromagnetic forces in opposite reciprocating electric generator with compensated power  $F_{1,1}$

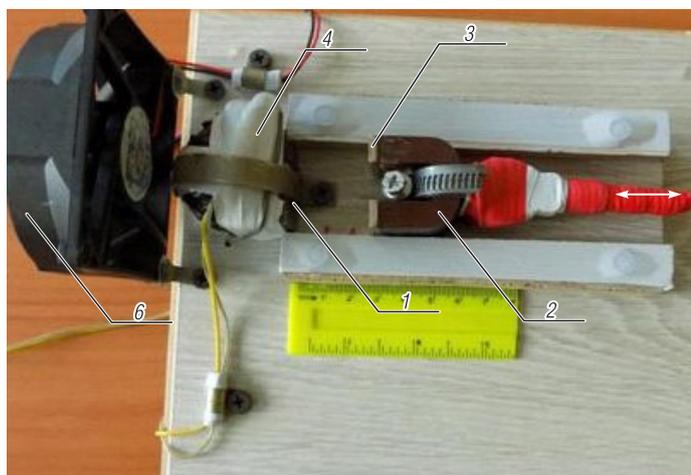
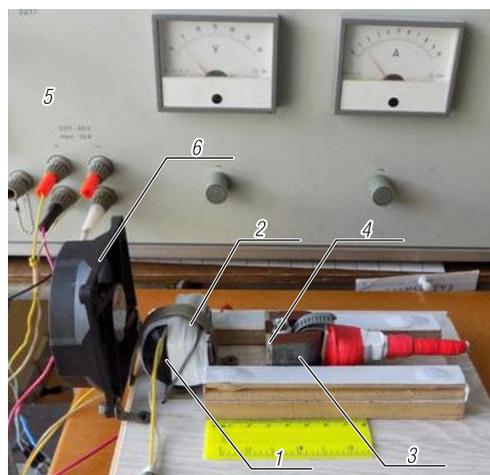


Рис. 8. Внешний вид макета однополярного 2-полюсного ВПЭГ продольного типа с ПМ

Fig. 8. Appearance of a model of a unipolar 2-pole reciprocating electric generator of longitudinal type with permanent magnets

витков обмотки составляет 300. При  $x_{ВПЭГ}^{**} \rightarrow \delta_{min}$  блок питания подключен к обмотке генератора таким образом, что созданное обмоткой магнитное поле противодействует изменению внешнего магнитного поля, в данном случае магнитного поля ПМ (рис. 9, a). А при  $x_{ВПЭГ}^{**} \rightarrow \delta_{max}$  блок питания подключен к обмотке генератора таким образом, что созданное обмоткой магнитное поле совпадает по направлению с внешним магнитным полем (рис. 9, b).

В результате экспериментальных исследований макета однополярного 2-полюсного ВПЭГ продольного типа с ПМ было выявлено, что при  $x_{ВПЭГ}^{**} \rightarrow \delta_{min}$  (рис. 9, a) результирующая сила, действующая на подвижную часть генератора, носила тормозной (демпфирующий) характер, а при  $x_{ВПЭГ}^{**} \rightarrow \delta_{max}$  результирующая сила – притягивала подвижную часть генератора (рис. 9, b).

С учетом того что при  $x_{ВПЭГ}^{**} \rightarrow \delta_{\min}$  и  $x_{ВПЭГ}^{**} \rightarrow \delta_{\max}$  сила  $F_{1,1}$  притягивает подвижную часть генератора, можно утверждать, что при  $x_{ВПЭГ}^{**} \rightarrow \delta_{\min}$  составляющие  $F_{1,2}$ ,  $F_{1,3}$  ЭМС генератора продольного типа носят тормозной характер (отталкивают подвижную часть генератора). Проведенные экспериментальные исследования макета ВПЭГ продольного типа с ПМ подтверждают, что КГ способен обеспечить в крайних положениях поршневой группы СПД суммарную силу тормозного характера и предотвратить аварийный случай – пропуск зажигания рабочей смеси в цилиндре СПД. Временные диаграммы ЭМС КГ при скомпенсированной силе  $F_{1,1}$  представлены на рис. 10.

Видно, что КГ за счет наличия продольно изменяющегося магнитного потока способен сформировать ЭМС электрической подсистемы, действующую на механическую подсистему энергоустановки на всем рабочем цикле. Это позволяет обеспечить согласование сил механической и электрической подсистем энергоустановки и выполнить условие непрерывного электромеханического преобразования энергии на всем рабочем цикле. В целях пояснения способа решения задачи согласования сил электрической и механической подсистем на рис. 11 представлены результаты математического моделирования мгновенных сил, действующих на поршневую группу в крайнем положении (такте сжатия) со стороны механической и электрической подсистем при работе генератора на линейную нагрузку (рис. 11, *a, b*) и при изменении тока в цепи генератора (рис. 11, *c, d*).

Показано, что КГ за счет наличия продольно изменяющегося магнитного потока формирует ЭМС  $\hat{F}^*$ , которая принимает максимальное значение в крайних положениях поршневой группы СПД. На рис. 11, *a* видно, что при работе генератора на линейную нагрузку составляющие ЭМС  $\hat{F}_{1,2}$  и  $\hat{F}_{1,3}$  ВПЭГ продольного типа в конце такта сжатия СПД принимают нулевое значение, а составляющая  $\hat{F}_{1,1}$  – максимальное. На рис. 11, *b* показано, что это не способно обеспечить в крайнем положении поршневой группы СПД суммарную силу  $\hat{F}_{\Sigma 0}$  тормозного характера и предотвратить аварийный случай – пропуск зажигания рабочей смеси в цилиндре СПД. Решение этой проблемы представляется возможным при изменении ЭМС КГ в крайнем положении поршневой группы (рис. 11, *c* и *d*) за счет изменения тока в рабочей обмотке генератора. В ходе теоретических исследований установлено, что управление током в рабочей обмотке КГ возможно при работе его на АВ. Таким образом, проведенные исследования составляющих (1)–(6) ЭМС КГ позволили автору данной статьи выработать практические рекомендации по применению КГ возвратно-поступательного типа в энергоустановках на базе СПД.

На основе ММ электрической (1)–(7) и механической (отчет о НИР №566358 «Технический облик перспективной системы энергоснабжения полевых и мобильных узлов связи») (Минск, 2018)) подсистем энергоустановки с СПД и КГ мною разработана имитационная модель механотронного модуля на базе СПД и КГ с АВ, структурная схема которой представлена на рис. 12.

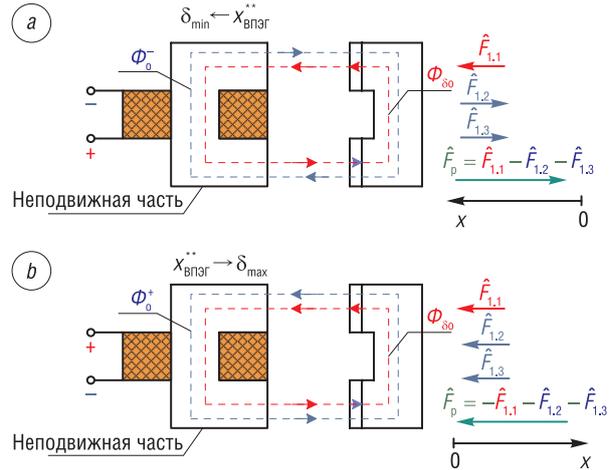


Рис. 9. Характер действия составляющих ЭМС ОВПЭГ-2 при: *a* –  $x_{ВПЭГ}^{**} \rightarrow \delta_{\min}$ ; *b* –  $x_{ВПЭГ}^{**} \rightarrow \delta_{\max}$

Fig. 9. The nature of the components of the electromagnetic force of the unipolar 2-pole reciprocating electric generator of the longitudinal type at: *a* –  $x_{ВПЭГ}^{**} \rightarrow \delta_{\min}$ ; *b* –  $x_{ВПЭГ}^{**} \rightarrow \delta_{\max}$

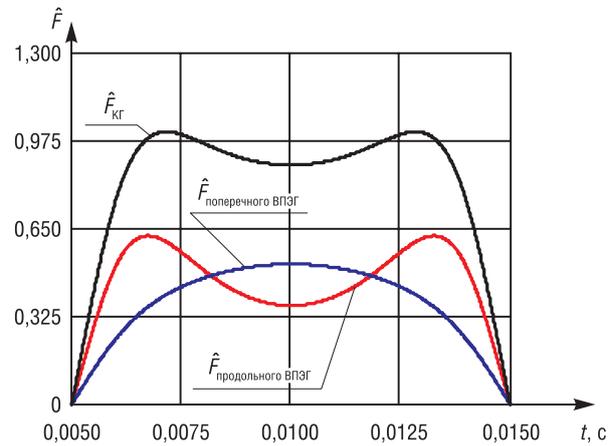


Рис. 10. Временные диаграммы ЭМС КГ при скомпенсированной силе  $F_{1,1}$

Fig. 10. Time diagrams of the electromagnetic force of the combined generator at the compensated force  $F_{1,1}$

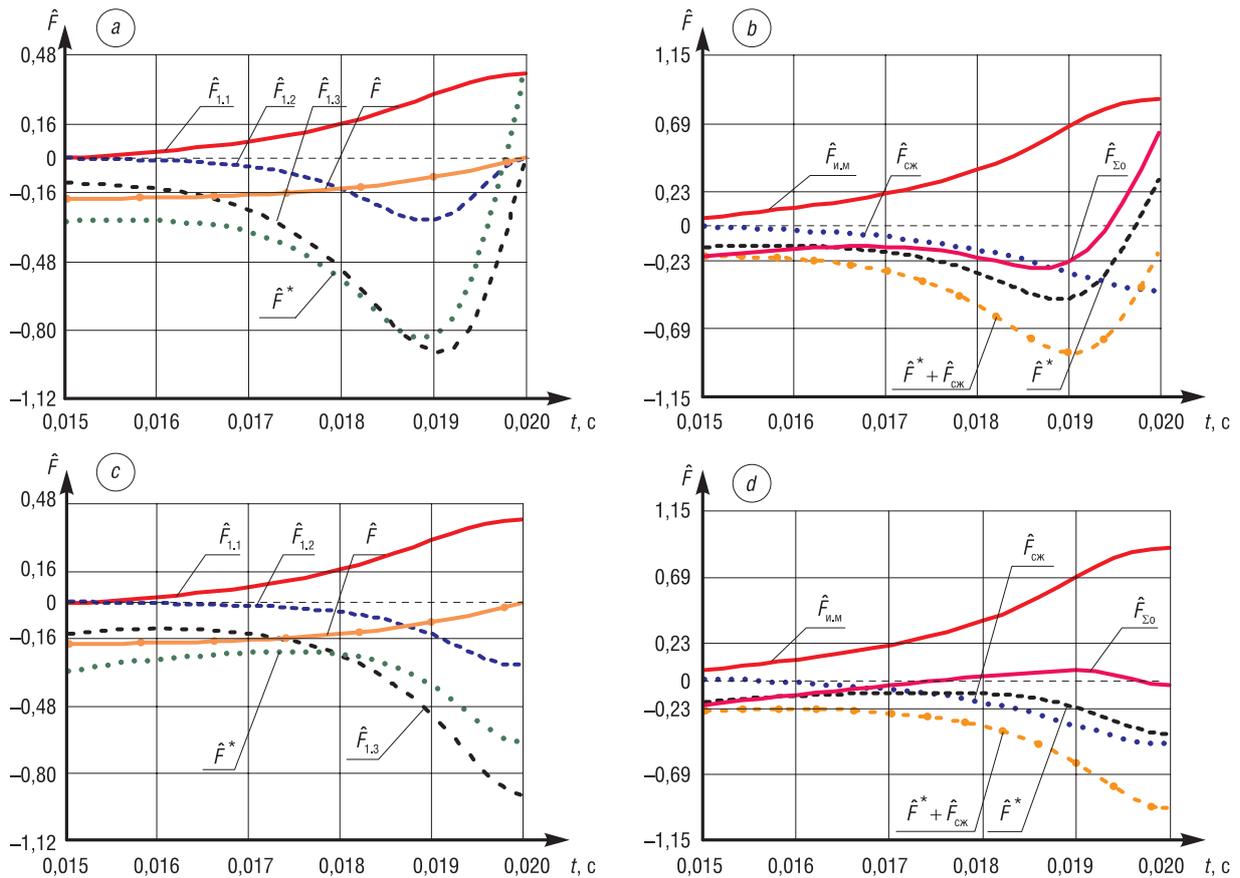


Рис. 11. Временные диаграммы мгновенных сил в крайнем положении поршневой группы (такте сжатия) СПД: *a, b* – при работе генератора на линейную нагрузку; *c, d* – при изменении тока в цепи генератора

Fig. 11. Time diagrams of instantaneous forces in the extreme position of the piston group (compression stroke) of the free piston engine: *a, b* – when the generator is running on a linear load; *c, d* – when the current in the generator circuit changes

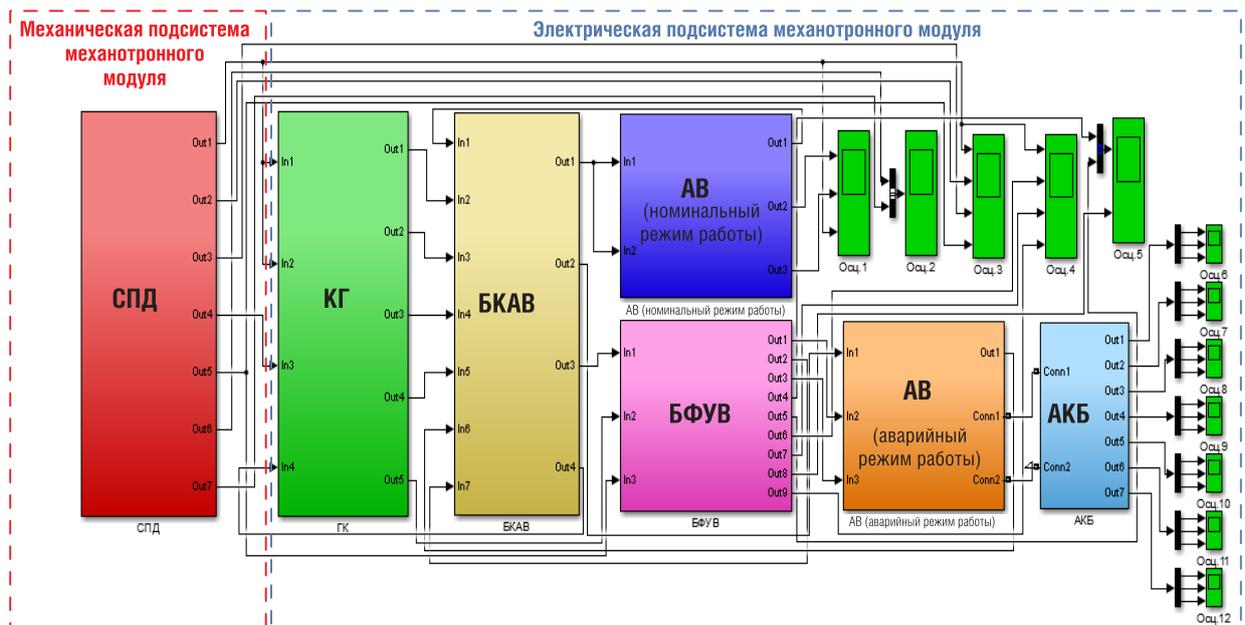


Рис. 12. Структурная схема имитационной модели мехатронного модуля: БКАВ – блок коммутации активного выпрямителя; БФУВ – блок формирования управляющего воздействия; АКБ – аккумуляторная батарея

Fig. 12. Block diagram of mechatronic module simulation model: БКАВ – active rectifier switching unit; БФУВ – control action forming unit; АКБ – accumulator battery

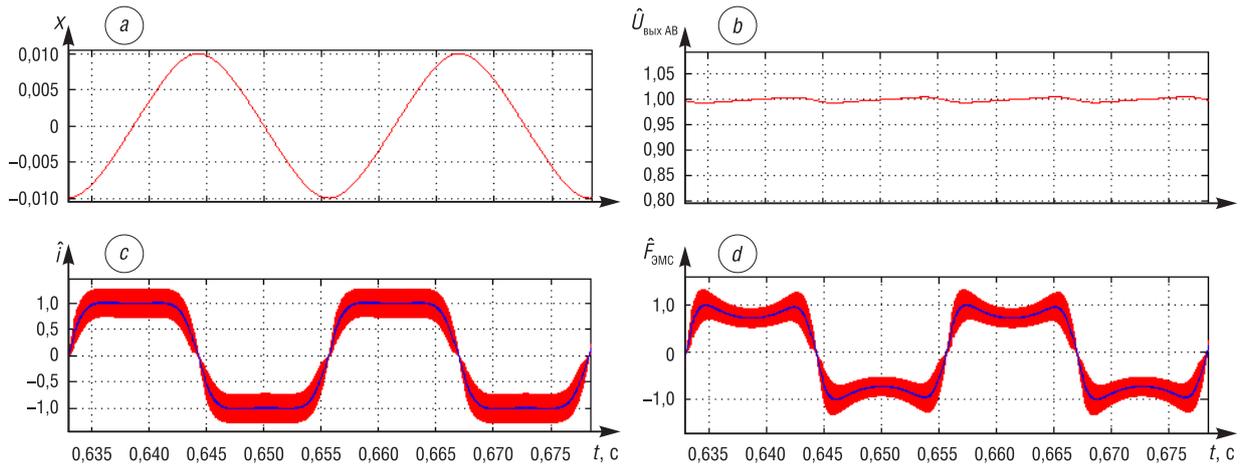


Рис. 13. Временные диаграммы: *a* – координаты перемещения поршневой группы; *b* – напряжения на выходе АВ; *c* – тока в рабочей обмотке КГ; *d* – ЭМС, действующей на поршневую группу со стороны электрической подсистемы  
 Fig. 13. Timing diagram: *a* – the coordinates of the moving piston group; *b* – output voltage of the active rectifier; *c* – current in the working winding of the combined generator; *d* – electromagnetic force acting on the piston group from the electrical subsystem

В результате математического моделирования мехатронного модуля получены временные диаграммы: координаты перемещения поршневой группы (рис. 13, *a*), напряжения на выходе АВ (рис. 13, *b*), тока в рабочей обмотке КГ (рис. 13, *c*) и ЭМС, действующей на поршневую группу со стороны электрической подсистемы (рис. 13, *d*).

Из результатов математического моделирования (рис. 13, *b*) видно, что АВ позволяет получить на выходе энергоустановки с КГ постоянное напряжение, размах пульсаций которого не превышает 4%. Кроме того, из рис. 13, *a, d* видно, что ЭМС электрической подсистемы действует на механическую подсистему энергоустановки на всем рабочем цикле, что позволяет выполнить условие непрерывного электромеханического преобразования энергии на всем рабочем цикле, а также обеспечить согласование сил механической и электрической подсистем энергоустановки и устранить основные недостатки энергоустановки с СПД (поломку при пропуске зажигания рабочей смеси и неустойчивость работы при значительных колебаниях нагрузки).

Разработка системы управления компенсацией сил электрической и механической подсистем энергоустановки в крайних положениях поршневой группы. В силу того что особую сложность вызывает решение задачи согласования сил электрической и механической подсистем энергоустановки в крайних положениях поршневой группы СПД, на рис. 14 представлена

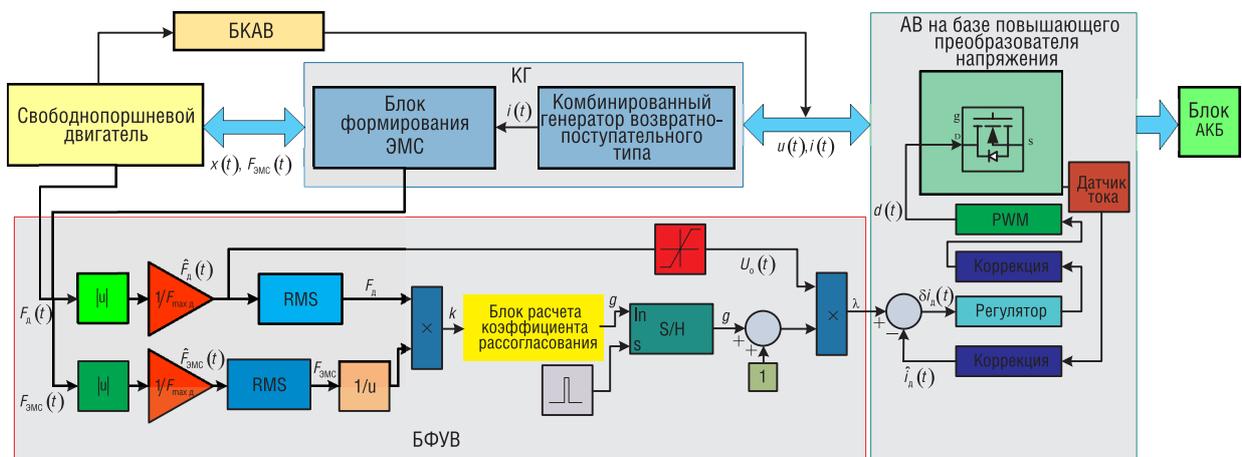


Рис. 14. Структурная схема имитационной модели мехатронного модуля при компенсации рассогласования сил электрической и механической подсистем энергоустановки в крайних положениях поршневой группы  
 Fig. 14. Block diagram of the mechatronic module simulation model for compensation of power mismatch between electrical and mechanical subsystems of the power plant in the extreme positions of the piston group

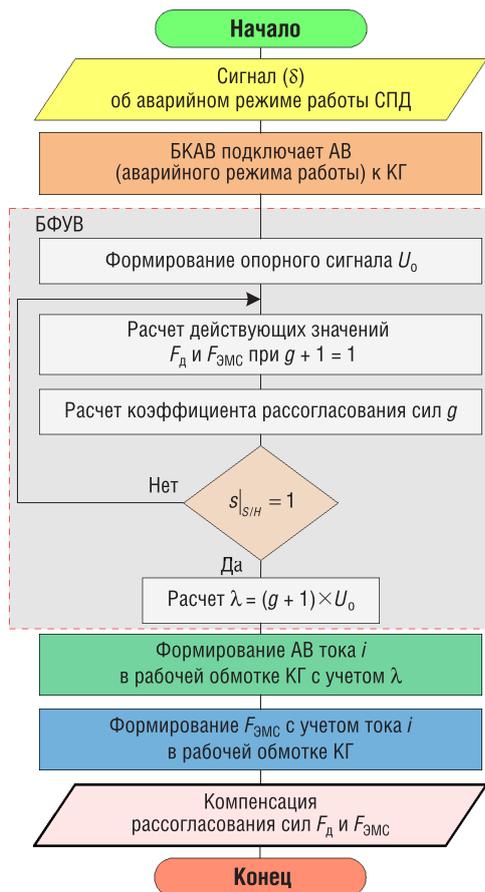


Рис. 15. Блок-схема алгоритма компенсации рассогласования сил электрической и механической подсистем энергоустановки в крайних положениях поршневой группы при аварийном режиме работы СПД

Fig. 15. Block diagram of the compensation algorithm for the misalignment of the electrical and mechanical subsystems of the power plant in the extreme positions of the piston group in the emergency operation of the free piston engine

разработанная автором данной статьи структурная схема имитационной модели механотронного модуля при компенсации рассогласования сил электрической и механической подсистем энергоустановки в крайних положениях поршневой группы в аварийном режиме работы СПД.

Блок-схема алгоритма компенсации рассогласования сил электрической и механической подсистем энергоустановки в крайних положениях поршневой группы при аварийном режиме работы СПД представлена на рис. 15.

К пояснению алгоритма компенсации. Опорный сигнал  $U_0(t)$  совпадает по форме с  $\hat{F}_d(t)$ . Это позволяет обеспечить в цепи генератора ток  $i(t)$ , а следовательно, и  $F_{ЭМС}(t)$ , согласованные во времени с  $F_d(t)$ . Расчет действующих значений сил осуществляется при  $\lambda(t) = 1 \cdot U_0(t)$ . Расчет коэффициента рассогласования сил  $g$  осуществляется в блоке расчета коэффициента рассогласования (рис. 14). Блок расчета коэффициента рассогласования построен на основе полинома  $n$ -й степени. Полином получен при аппроксимации рассчитанных по имитационной модели (рис. 16) коэффициентов рассогласования сил  $g$ , в результате многократного машинного анализа функционирования механотронного модуля при аварийном режиме работы СПД. Блок-схема алгоритма расчета коэффициентов рассогласования представлена на рис. 17.

Полученный полином позволяет по отношению действующих значений сил  $F_d(t)$  и  $F_{ЭМС}(t)$  найти коэффициент рассогласования сил  $g$ , обеспечивающий компенсацию сил электрической и механической подсистем энергоустановки в крайних положениях поршневой группы при аварийном режиме работы СПД. Степень полинома определяет точность расчета коэффициента рассогласования сил  $g$ .

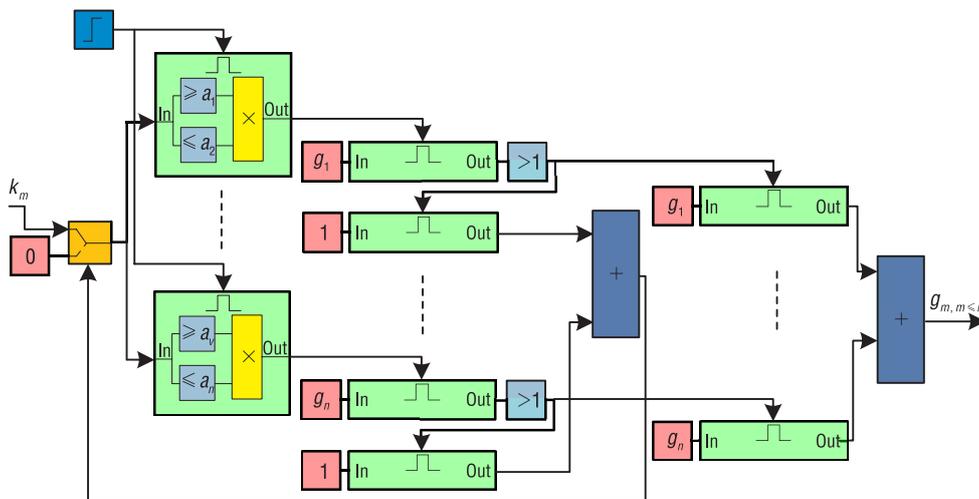


Рис. 16. Структурная схема имитационной модели для расчета коэффициентов рассогласования  
 Fig. 16. Structural diagram of a simulation model to calculate the coefficients of the error

Затем при  $s|_{S/H} = 1$  (начало торможения) рассчитывается  $\lambda(t) = (g + 1) \cdot U_0(t)$ . На основании полученной  $\lambda(t)$  АВ формирует ток в рабочей обмотке генератора, форма которого совпадает с формой  $U_0(t)$ , а амплитуда увеличивается пропорционально  $(g + 1)$ . Затем блок формирования ЭМС на основании тока  $i(t)$  формирует ЭМС, которая компенсирует рассогласование сил энергоустановки. В качестве примера на рис. 18 представлены результаты математического моделирования механотронного модуля в режиме компенсации рассогласования сил электрической и механической подсистем в энергоустановки.

Видно, что механотронный модуль на базе СПД и КГ с АВ в режиме компенсации рассогласования сил электрической и механической подсистем способен эффективно скомпенсировать в крайних положениях поршневой группы движущую силу СПД. Это в аварийном режиме работы СПД позволит затормозить поршневую группу и тем самым предотвратить повреждение поршневой группы и цилиндра. При этом в момент торможения подвижной части ЭМС электрическая энергия частично запасается в АКБ.

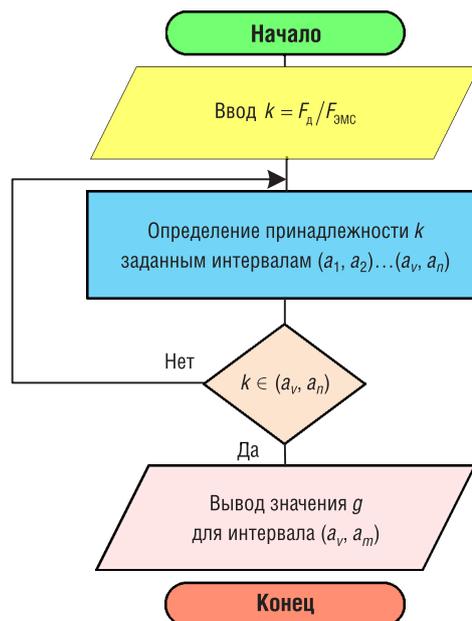


Рис. 17. Блок-схема алгоритма расчета коэффициентов рассогласования

Fig. 17. Block diagram of the algorithm for calculating the coefficients of misalignment

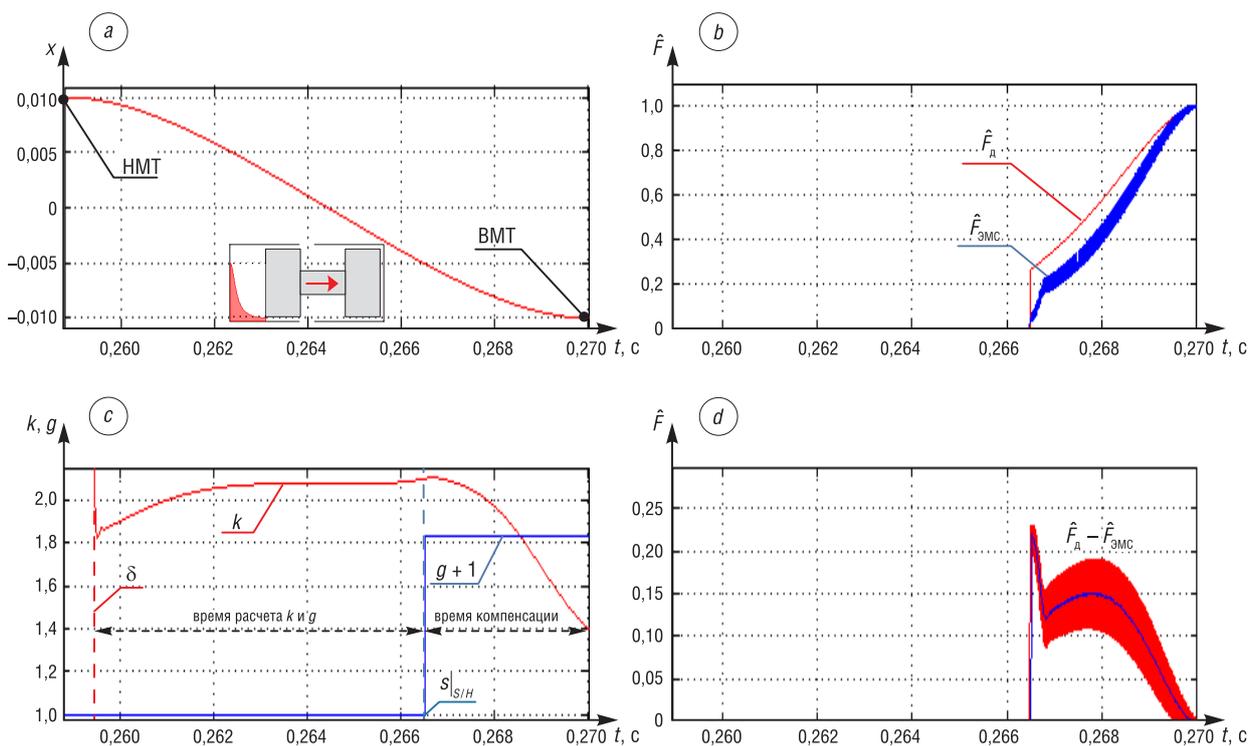


Рис. 18. Временные диаграммы, поясняющие процесс компенсации рассогласования сил электрической и механической подсистем энергоустановки в крайних положениях поршневой группы при аварийном режиме работы СПД: *a* – координаты перемещения поршневой группы; *b* – сил действующих со стороны механической и электрической подсистем; *c* – управляющих сигналов и коэффициента рассогласования; *d* – разность сил механической и электрической подсистем

Fig. 18. Time diagrams explaining the process of compensation of misalignment of forces of electrical and mechanical subsystems of the power plant in the extreme positions of the piston group in emergency operation of the free piston engine: *a* – coordinates of movement of the piston group; *b* – forces acting on the part of mechanical and electrical subsystems; *c* – control signals and the coefficient of misalignment; *d* – the difference between the forces of mechanical and electrical subsystems

Таким образом, в результате проведенных исследований: обоснована возможность применения ЭМПЭ возвратно-поступательного типа с продольным нелинейным изменением магнитного потока в энергоустановке с СПД; обосновано, что КГ возвратно-поступательного типа с поперечным и продольным нелинейным изменением магнитного потока, работающий на АВ, позволяет сформировать в электрической подсистеме энергоустановки ЭМС, согласованную во времени с силами механической подсистемы энергоустановки на всем рабочем цикле; разработан способ решения задачи согласования сил механической и электрической подсистем энергоустановки со свободнопоршневым двигателем на всем рабочем цикле, отличающийся использованием в электрической подсистеме энергоустановки электромеханического преобразователя энергии возвратно-поступательного типа с поперечным и продольным нелинейным изменением магнитного потока. Согласование сил механической и электрической подсистем энергоустановки на всем рабочем цикле позволяет обеспечить выполнение условия непрерывного электромеханического преобразования энергии на всем рабочем цикле.

*Оценка эффективности.* В целях определения эффективности разработанного способа решения задачи согласования сил механической и электрической подсистем энергоустановки с СПД на всем рабочем цикле проведена оценка удельной массы и КПД КГ с Ж-образным МПр по отношению к ВПЭГ поперечного типа (с С-образным МПр, Ж-образным МПр, с кольцевым и сдвоенным МПр) при одинаковых электромагнитных нагрузках (отчет о НИР № 566358 «Технический облик перспективной системы энергоснабжения полевых и мобильных узлов связи»). Исходные данные для оценки удельной массы и КПД КГ представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Исходные данные для оценки удельной массы и КПД КГ

Table 1. Initial data for estimating the specific gravity and efficiency of the combined generator

Параметр	Значение
Максимальное значение плотности тока, А/м <sup>2</sup>	1 · 10 <sup>7</sup>
Максимальное значение магнитной индукции в МПр, Тл	1,8
Номинальное напряжение на зажимах генератора, В	220
Минимальный воздушный зазор, мм	0,5
Рабочий ход, мм	25
Частота колебания, Гц	100
Шаг перемещения подвижной части генератор Δx <sub>т</sub> , мм	0,04

Для оценки удельной массы и КПД КГ мною разработана имитационная модель КГ с общим МПр, а также ВПЭГ продольного типа, структурная схема которой представлена на рис. 19.

Приращение КПД КГ рассчитывается следующим образом:

$$\Delta\eta = (\eta_{\text{КГ}}/\eta_{\text{поп}} - 1)100 \%, \quad (8)$$

где  $\eta_{\text{КГ}}$  – КПД КГ;  $\eta_{\text{поп}}$  – КПД ВПЭГ поперечного типа.

Уменьшение удельной массы КГ составляет:

$$\Delta M_{\text{уд}} = M_{\text{уд.поп}}/M_{\text{уд.КГ}}, \quad (9)$$

где  $M_{\text{уд.поп}}$  – удельная масса ВПЭГ поперечного типа;  $M_{\text{уд.КГ}}$  – удельная масса КГ.

С учетом исходных данных (см. табл. 1) в мощностном диапазоне 300–1500 Вт с шагом 100 Вт для рассматриваемых типов генераторов рассчитаны  $\Delta M_{\text{уд}}$  и  $\Delta\eta$ . Этапы расчета  $\Delta M_{\text{уд}}$  и  $\Delta\eta$ : электромагнитный расчет рассматриваемых типов генераторов по разработанной универсальной методике (отчет о НИР № 566358 «Технический облик перспективной системы энергоснабжения полевых и мобильных узлов связи» (Минск, 2018)); на основе полученных результатов с помощью

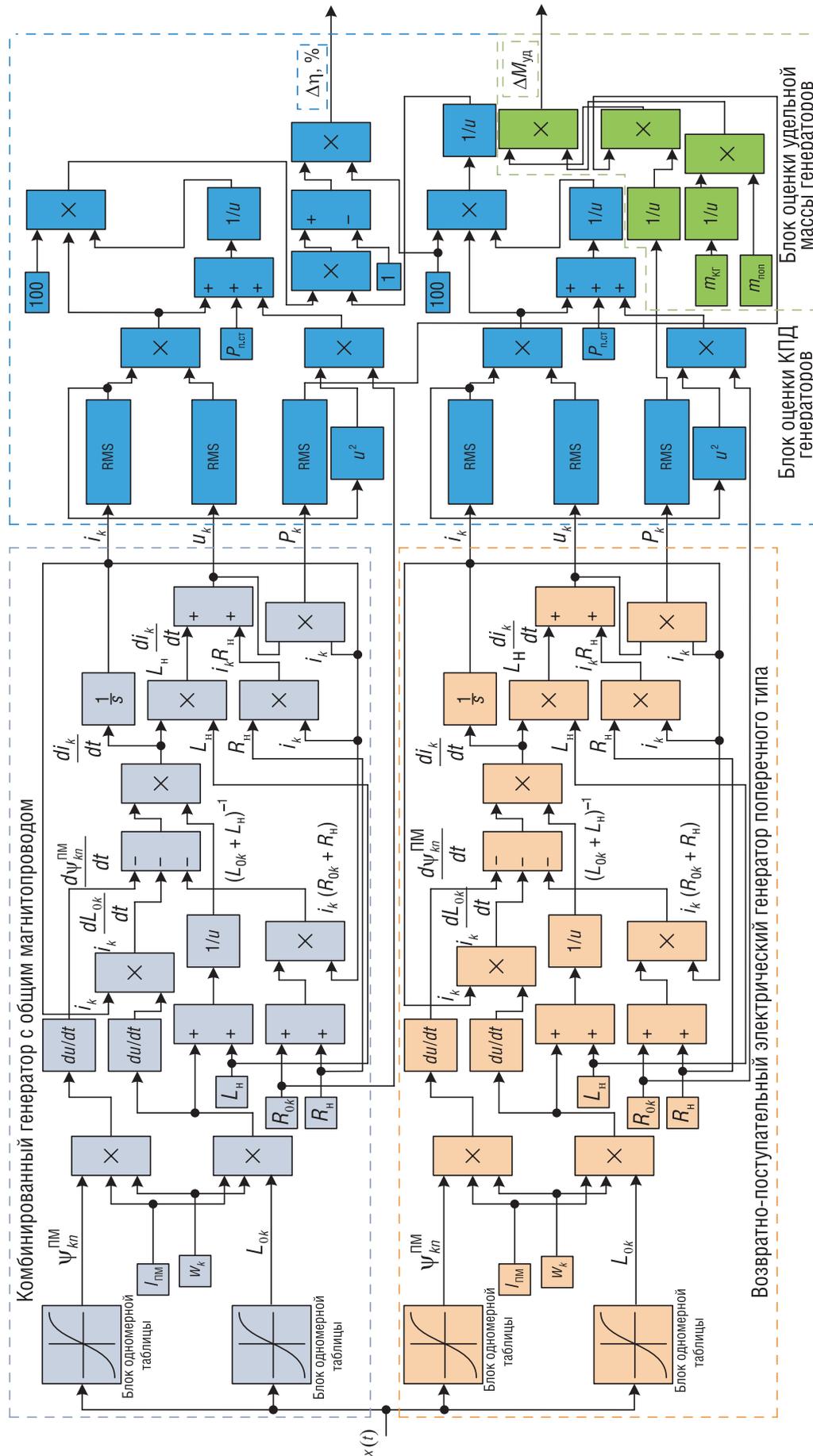


Рис. 19. Структурная схема имитационной модели для оценки КПД с общим МПР и ВПЭГ поперечного типа.  $\Psi_{kn}^{PM}$  – потокоцепление  $k$ -го контура, обусловленное  $n$ -м ПМ,  $n \neq k$ ;  $L_{0k}$  – собственная индуктивность  $k$ -го контура;  $m_{ген}$  – масса ВПЭГ поперечного типа;  $P_{п.ст}$  – мощность потерь в стали МПР генератора

Fig. 19. Structural diagram of a simulation model to estimate the combined generator General generator yoke and cross type:  $\Psi_{kn}^{PM}$  – flux linkage of the  $k^{th}$  loop due to the  $n^{th}$  permanent magnet,  $n \neq k$ ;  $L_{0k}$  – self-inductance of the  $k^{th}$  circuit;  $m_{ген}$  – mass of reciprocating transverse type electric generator;  $P_{п.ст}$  – power losses in the steel of the magnetic circuit of the generator

разработанной имитационной модели (см. рис. 19) для рассматриваемых типов генераторов рассчитаны  $\Delta M_{уд}$  и  $\Delta \eta$ . Результаты расчета  $\Delta M_{уд}$  и  $\Delta \eta$  сведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Результаты расчета  $\Delta M_{уд}$  и  $\Delta \eta$   
T a b l e 2. Result of calculation  $\Delta M_{уд}$  и  $\Delta \eta$

КГ с Ж-образным МПр	ВПЭГ поперечного типа							
	с С-образным МПр		с Ж-образным МПр		с кольцевым МПр		сдвоенный	
	$\Delta M_{уд}, \%$	$\Delta \eta, \%$	$\Delta M_{уд}, \%$	$\Delta \eta, \%$	$\Delta M_{уд}, \%$	$\Delta \eta, \%$	$\Delta M_{уд}, \%$	$\Delta \eta, \%$
300–400 Вт	13,14	3,14	13,24	3,21	13,41	2,91	13,40	2,92
400–500 Вт	13,23	3,15	13,26	3,22	13,44	2,92	13,43	2,93
500–600 Вт	13,14	3,16	13,28	3,23	13,46	2,93	13,45	2,94
600–700 Вт	13,18	3,17	13,29	3,24	13,48	2,94	13,46	2,95
700–800 Вт	13,21	3,18	13,27	3,24	13,52	2,94	13,50	2,96
800–900 Вт	13,27	3,17	13,26	3,25	13,55	2,95	13,51	2,97
900–1000 Вт	13,26	3,16	13,27	3,25	13,60	2,95	13,54	2,97
1000–1100 Вт	13,24	3,15	13,28	3,24	13,58	2,94	13,52	2,96
1100–1200 Вт	13,25	3,15	13,27	3,23	13,55	2,93	13,50	2,95
1200–1300 Вт	13,25	3,14	13,24	3,22	13,51	2,92	13,49	2,94
1300–1400 Вт	13,24	3,13	13,23	3,21	13,50	2,91	13,49	2,93
1400–1500 Вт	13,21	3,13	13,21	3,20	13,47	2,90	13,45	2,91

Проведенные вычислительные эксперименты (см. табл. 2) позволили определить, что уменьшение удельной массы КГ возвратно-поступательного типа составляет не более 13,6 % с одновременным повышением КПД генераторов не более чем на 3,3 % по сравнению с ВПЭГ поперечного типа (с С-образным МПр, Ж-образным МПр, с кольцевым и сдвоенным МПр) при одинаковых электромагнитных нагрузках.

**Заключение.** В целях оценки эффективности применения энергоустановки с КГ возвратно-поступательного типа в АСЭС мобильных средств специального назначения автором настоящей статьи была разработана методика оценки приращения времени непрерывной работы АСЭС (отчет о НИР № 566358 «Технический облик перспективной системы энергоснабжения полевых и мобильных узлов связи» (Минск, 2018)). Отличительной особенностью данной методики является использование показателя «освобожденная (высвобожденная) масса» для расчета запаса топлива АСЭС. Предложенный показатель позволил учесть влияние удельной массы и КПД КГ возвратно-поступательного типа на общую массу АСЭС мобильных средств специального назначения с учетом запаса топлива. На основе разработанной методики была проведена оценка приращения времени непрерывной работы АСЭС мобильных средств специального назначения (на примере мобильных средств военной связи). В результате анализа (отчет о НИР № 566358 «Технический облик перспективной системы энергоснабжения полевых и мобильных узлов связи» (Минск, 2018)) установлено, что применение в мобильных средствах военной связи энергоустановки с КГ возвратно-поступательного типа, позволяет увеличить время непрерывной работы АСЭС мобильных средств военной связи до 3,5 раз.

Таким образом, разработанный автором способ решения задачи согласования сил механической и электрической подсистем энергоустановки с СПД на всем рабочем цикле, отличающийся использованием в электрической подсистеме энергоустановки ЭМПЭ возвратно-поступательного типа с поперечным и продольным нелинейным изменением магнитного потока, позволяет уменьшить удельную массу электрической подсистемы энергоустановки не более чем на 13,6 % при одновременном повышении КПД не более чем на 3,3 %. Данное решение увеличивает время непрерывной работы АСЭС мобильных средств специального назначения (мобильных средств военной связи) до 3,5 раз.

**Список использованных источников**

1. Пинский, Ф.И. Энергоустановки со свободнопоршневыми двигатель-генераторами / Ф.И. Пинский // Мобильная техника. – 2004. – №2. – С. 13–17.
2. Sawthorne, W.R. Optimization of a Brushless Permanent Magnet Linear Alternator for Use with a Linear Internal Combustion Engine / W.R. Sawthorne. – Morgantown, 1999. – 113 p.
3. 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.
4. Петриченко, Д.А. Подход к электромеханическому управлению крайними положениями поршня в свободнопоршневом генераторе / Д.А. Петриченко, Л.Ю. Лежнев // Достижения вуз. науки. – 2014. – №12. – С. 109–117.
5. Татарников, А.П. Разработка свободнопоршневой энергоустановки на базе двухтактного двигателя и линейных электрических машин / А.П. Татарников // Новая наука: стратегии и векторы развития. – 2016. – №5-2. – С. 256–265.
6. 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>
7. Hanipah, M.R. Recent commercial free-piston engine developments for automotive applications / M.R. Hanipah, R. Mikalsen, A.P. Roskilly // Appl. Therm. Eng. – 2015. – Vol. 75. – P. 493–503. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.09.039>
8. Li, Q.F. Simulation of a two-stroke free-piston engine for electrical power generation / Q.F. Li, J. Xiao, Z. Huang // Energy Fuels. – 2008. – Vol. 22, iss. 5. – P. 3443–3449. <https://doi.org/10.1021/ef800217k>
9. Multi-dimensional scavenging analysis of a free-piston linear alternator based on numerical simulation / J. Mao [et al.] // Appl. Energy. – 2011. – Vol. 88, iss. 4. – P. 1140–1152. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.10.003>
10. The operation of free piston linear generator engine using MOSFET and IGBT drivers / A.A. Ibrahim [et al.] // J. Appl. Sci. – 2011. – Vol. 11, №10. – P. 1791–1796. <https://doi.org/10.3923/jas.2011.1791.1796>
11. Mikalsen, R. The control of a free-piston engine generator. Part 2: Engine dynamics and piston motion control / R. Mikalsen, A. Roskilly // Appl. Energy. – 2010. – Vol. 87, iss. 4. – P. 1281–1287. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.06.035>
12. The free-piston linear generator potentials and challenges / F. Kock [et al.] // MTZ Worldwide. – 2013. – Vol. 74, №10. – P. 38–43. <https://doi.org/10.1007/s38313-013-0099-z>
13. Менжинский, А.Б. Применение возвратно-поступательного генератора комбинированной конструкции для повышения КПД и уменьшения удельной массы энергоустановок автономных образцов вооружения / А.Б. Менжинский, А.Н. Малашин, И.В. Митянов // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2017. – №4. – С. 62–72.
14. Хитерер, М.Я. Синхронные электрические машины возвратно-поступательного движения: учеб. пособие / М.Я. Хитерер, И.Е. Овчинников. – СПб.: Корона принт, 2013. – 357 с.
15. 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. – 2018. – №2. – С. 74–85.

**References**

1. Pinski F. I. Power plants with free piston engine generators. *Mobil'naya Tekhnika* [Mobile Technology], 2004, no. 2, pp. 13–17 (in Russian).
2. Sawthorne, W.R. *Optimization of a Brushless Permanent Magnet Linear Alternator for Use with a Linear Internal Combustion Engine*. Morgantown, 1999. 113 p.
3. 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).
4. Petrichenko D. A., Lezhnev L. J. The electromechanical approach to the management of the extreme positions of the piston free piston generator. *Dostizhenia vyzovskoi nauki = Achievements of High School Science*, 2014, no. 12, pp. 109–117 (in Russian).
5. Tatarnikov A. P. Development of a free-piston power plant based on a two-stroke engine and linear electric machines. *Novai nauka: strategii i vektori razvitiia = New science: strategies and vectors of development*, 2016, no. 5–2, pp. 256–265 (in Russian).
6. Chia-Jui Chiang, Jing-Long Yang, Shao-Ya Lan, 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>
7. Hanipah M. R., Mikalsen R., Roskilly A. P. Recent commercial free-piston engine developments for automotive applications. *Applied Thermal Engineering*, 2015, vol. 75, pp. 493–503. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.09.039>
8. Li Q. F., Xiao J., Huang Z. Simulation of a two-stroke free-piston engine for electrical power generation. *Energy and Fuels*, 2008, vol. 22, iss. 5, pp. 3443–3449. <https://doi.org/10.1021/ef800217k>
9. Mao J., Zuo Z., Li W., Feng H. Multi-dimensional scavenging analysis of a free-piston linear alternator based on numerical simulation. *Applied Energy*, 2011, vol. 88, iss. 4, pp. 1140–1152. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.10.003>

10. Ibrahim A. A., Aziz A. R. A., Abi E. Z. B. Z., Zulkifli S. A. The operation of free piston linear generator engine using MOSFET and IGBT drivers. *Journal of Applied Sciences*, 2011, vol. 11, iss. 10, pp. 1791–1796. <https://doi.org/10.3923/jas.2011.1791.1796>
11. Mikalsen R., Roskilly A. The control of a free-piston engine generator. Part 2: Engine dynamics and piston motion control. *Applied Energy*, 2010, vol. 87, iss. 4, pp. 1281–1287. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.06.035>
12. Kock F., Heron A., Rinderknecht F., Friedrich H. E. The free-piston linear generator potentials and challenges. *MTZ Worldwide*, 2013, vol. 74, no. 10, pp. 38–43. <https://doi.org/10.1007/s38313-013-0099-z>
13. 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 VoЕННОI akademii Respubliki Belarus' = Bulletin of the Military Academy of the Republic of Belarus*, 2017, no. 4, pp. 62–72 (in Russian).
14. Khiterer M. Ya., Ovchinnikov I. E. *Synchronous Electric Reciprocating Machines*. St. Petersburg, Korona-print Publ., 2013. 368 p. (in Russian).
15. Menzhinskii A. B., Malashin A. N., Koval J. G., Mathematical model of the generator of the combined design of reciprocating type. *Vestnik Gomelskogo technicheskogo universiteta = Bulletin of Gomel State Technical University*, 2018, no. 2, pp. 74–85 (in Russian).

### **Информация об авторе**

*Менжинский Андрей Борисович* – старший преподаватель, кафедра электротехники и систем электропитания, Военная академия Республики Беларусь (пр. Независимости, 220, 220057, Минск, Республика Беларусь). E-mail: volna05011990@mail.ru

### **Information about the authors**

*Andrei B. Menzhinsky* – Senior Lecturer, 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