

УДК 621.313

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ С ПРОДОЛЬНОМ ИЗМЕНЕНИЕМ МАГНИТНОГО ПОТОКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

**А. Б. МЕНЖИНСКИЙ, А. Н. МАЛАШИН**

*Учреждение образования «Военная академия  
Республики Беларусь», г. Минск*

**П. Б. МЕНЖИНСКИЙ**

*Учреждение образования «Гродненский  
государственный университет имени Я. Купалы»,  
Республика Беларусь*

**О. В. СИДЯКО**

*ОАО «ВОЛАТАВТО», г. Минск, Республика Беларусь*

*В последнее время наблюдается активный рост научных разработок в области электромеханических преобразователей энергии возвратно-поступательного движения, нашедших широкое применение в системах «свободнопоршневой двигатель – электрическая машина». Также одним из перспективных направлений является использование электрических генераторов возвратно-поступательного движения для преобразования механической энергии колебания, тряски, вибрации какого-либо физического тела или среды в электроэнергию. Для этого в большей степени подходят электрические генераторы возвратно-поступательного движения с продольным изменением магнитного потока. Однако исследованию генераторов с продольным изменением магнитного потока не уделяется должного внимания. Недостаточный объем информации о генераторах такого типа не позволяет в полной мере разработать новые принципы реализации (в виде структур) электрических генераторов возвратно-поступательного движения с продольным изменением магнитного потока.*

*С целью решения этой задачи проведено моделирование магнитного поля генераторов с продольным изменением магнитного потока, в результате которого выявлены основные магнитные потоки и построена эквивалентная схема магнитной цепи генератора. Кроме того, предложена новая структура электрического генератора возвратно-поступательного движения с продольным изменением магнитного потока.*

**Ключевые слова:** магнитное поле, электромеханический преобразователь энергии, электрический генератор возвратно-поступательного движения, метод конечных элементов.

## **MODELING OF MAGNETIC FIELD OF ELECTRIC RECIPROCATING GENERATOR WITH LONGITUDINAL VARIATION OF MAGNETIC FLUX USING THE FINITE ELEMENT METHOD**

**A. B. MENZHINSKY, A. N. MALASHIN**

*Educational Institution “Military academy of the Republic  
of Belarus”, Minsk*

**P. B. MENZHINSKY**

*Educational Institution “Yanka Kupala State University of Grodno”, the Republic of Belarus*

**O. V. SIDIAKO**

*ОАО “VOLATAUTO”, Minsk, the Republic of Belarus*

*Recently, there has been an active growth of scientific developments in the field of electromechanical converters of reciprocating motion energy, which have found wide application in the “free piston engine – electric machine” systems. Also one of the promising areas is the use of electrical generators of reciprocating motion to convert the mechanical energy of oscillation, shaking, vibration of any physical body or environment into electricity. The more suitable purpose for this is electric reciprocating generators with a longitudinal change in magnetic flux. However, the study of generators with a longitudinal change in magnetic flux is not given proper attention. Insufficient amount of information about generators of this type does not allow to fully develop new principles of implementation (in the form of structures) of electric reciprocating motion generators with longitudinal change in magnetic flux.*

*In order to solve this issue, simulation of magnetic field of generators with longitudinal change of magnetic flux was carried out, as a result the main magnetic fluxes were identified and an equivalent diagram of the generator magnetic circuit was constructed. In addition, the article proposes a new structure of electric reciprocating generator with longitudinal change of magnetic flux.*

**Keywords:** magnetic field, electromechanical energy converter, electric converter of reciprocating motion energy, finite element method.

**Введение**

В последнее время наблюдается активный рост научных разработок в области электромеханических преобразователей энергии (ЭМПЭ) возвратно-поступательного движения [1], нашедших широкое применение в системах «свободнопоршневой двигатель – ЭМПЭ возвратно-поступательного движения» [2]–[6]. В [7] отмечено, что на среднесрочную перспективу (5–10 лет) в Республике Беларусь необходимо осуществить переход с дизель-генераторных силовых установок вращательного действия на свободнопоршневые дизель-генераторные установки.

Также одним из перспективных направлений является использование электрических генераторов возвратно-поступательного движения (ЭГВПД) для преобразования механической энергии колебания, тряски, вибрации какого-либо физического тела или среды в электроэнергию. Большое количество работ, посвященных разработкам и исследованию ЭГВПД в отечественной и зарубежной литературе, свидетельствует об актуальности данной тематики [8].

Анализ существующих ЭМПЭ возвратно-поступательного движения [8] показал, что в настоящее время исследуется широкий спектр различных конструкций ЭГВПД, преобразующих механическую энергию возвратно-поступательного движения в электроэнергию. Это говорит о том, что идет активный поиск новых принципов реализации ЭГВПД, позволяющих с большей эффективностью преобразовывать механическую энергию возвратно-поступательного движения в электроэнергию. Для преобразования механической энергии колебания, тряски, вибрации какого-либо физического тела или среды в электроэнергию в большей степени подходят ЭГВПД с продольным изменением магнитного потока [8]. Однако обобщение научной литературы показало, что исследованию ЭГВПД с продольным изменением магнитного потока не уделяется должного внимания, что не позволяет, в полной мере разработать новые принципы реализации (в виде структур) ЭГВПД с продольным изменением магнитного потока.

Поэтому целью работы является моделирование магнитного поля (МП) ЭГВПД с продольным изменением магнитного потока с помощью метода конечных элементов (МКЭ) для выявления основных магнитных потоков в магнитной системе гене-

ратора и построения эквивалентной схемы магнитной цепи ЭГВПД с продольным изменением магнитного потока. Кроме того, на основании анализа результатов моделирования МП генератора предлагается новый принцип реализации (в виде структуры) ЭГВПД с продольным изменением магнитного потока.

### Основная часть

#### Моделирование МП ЭГВПД с продольным изменением магнитного потока.

Для выявления основных магнитных потоков в магнитной системе генератора и построения эквивалентной схемы магнитной цепи ЭГВПД с продольным изменением магнитного потока необходимо построить двухмерную конечно-элементную модель МП магнитной системы ЭГВПД с продольным изменением магнитного потока.

Основными этапами создания модели являются [9]:

- ввод геометрических объектов;
- задание свойств сред, источников поля (задание тока в обмотках, для постоянного магнита (ПМ) – коэрцитивной силы) и граничных условий (на внутренних и внешних границах областей задаются граничные условия Неймана и Дирихле);
- построение сетки конечных элементов во всех блоках, входящих в расчетную область.

На рис. 1–7 представлены двухмерные конечно-элементные модели МП, полученные с помощью МКЭ, тех областей магнитной системы ЭГВПД с продольным изменением магнитного потока, которые имеют магнитные потоки различного характера (области пазов рабочей обмотки и обмотки возбуждения; области воздушного зазора, магнитопровода (МПр) и ПМ), и тем самым представляют повышенный интерес для исследования картины распределения МП. Кроме того, на рис. 6 и 7 представлены распределения векторов магнитной индукции и магнитного потенциала, а на рис. 7 также представлено распределение плотности энергии МП в воздушном зазоре ЭГВПД с продольным изменением магнитного потока.

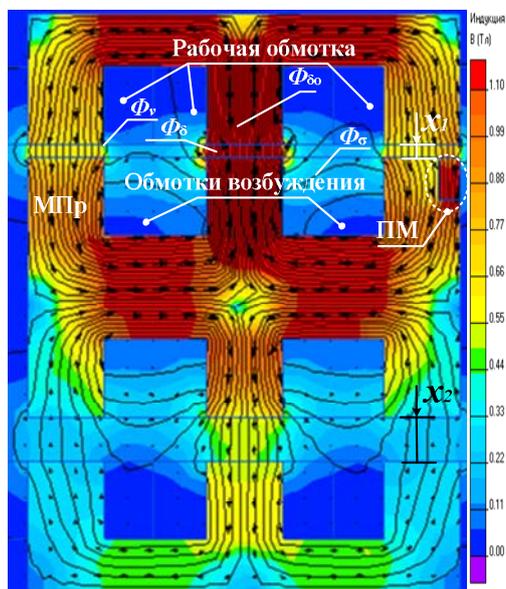


Рис. 1. Двухмерная конечно-элементная модель МП магнитной системы ЭГВПД

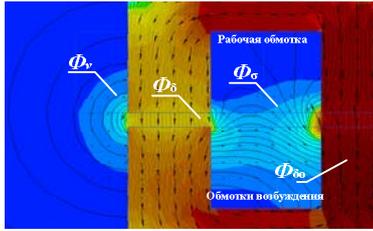


Рис. 2. Двухмерная конечно-элементная модель МП в области пазов рабочей обмотки и обмотки возбуждения

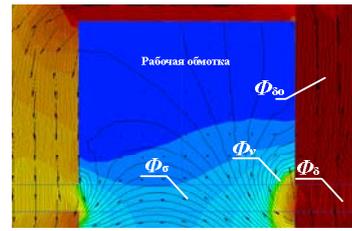


Рис. 3. Двухмерная конечно-элементная модель МП в области паза рабочей обмотки

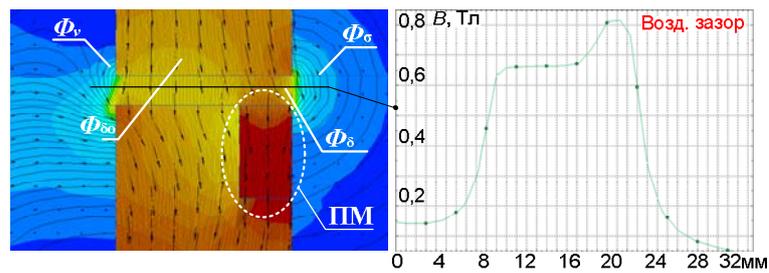


Рис. 4. Двухмерная конечно-элементная модель МП в области воздушного зазора и ПМ с распределением вектора магнитной индукции в воздушном зазоре

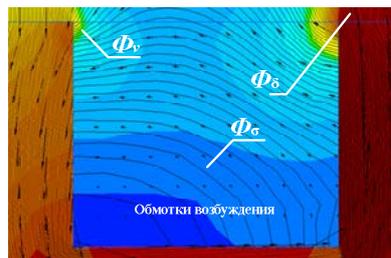


Рис. 5. Двухмерная конечно-элементная модель МП в области паза обмотки возбуждения

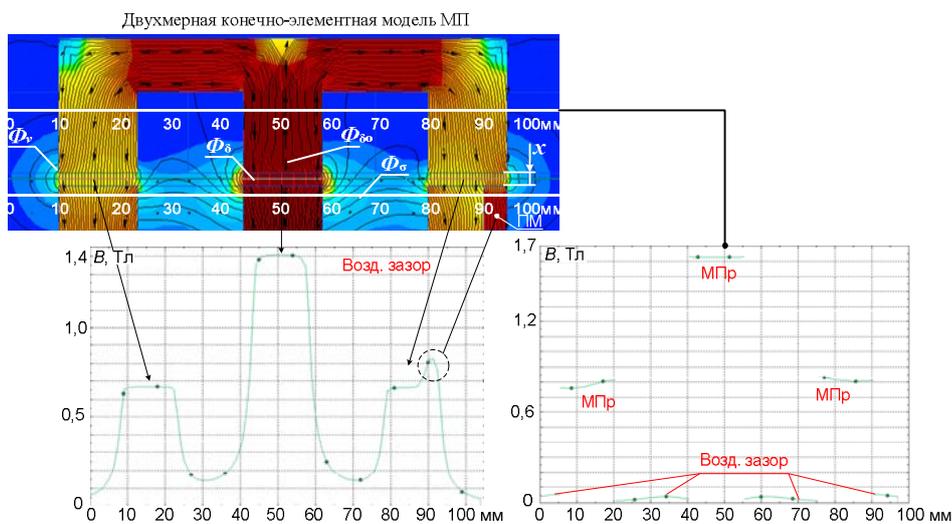


Рис. 6. Двухмерная конечно-элементная модель МП ЭГВПД с распределением вектора магнитной индукции в воздушном зазоре и МПр при  $x = 2,5$  мм

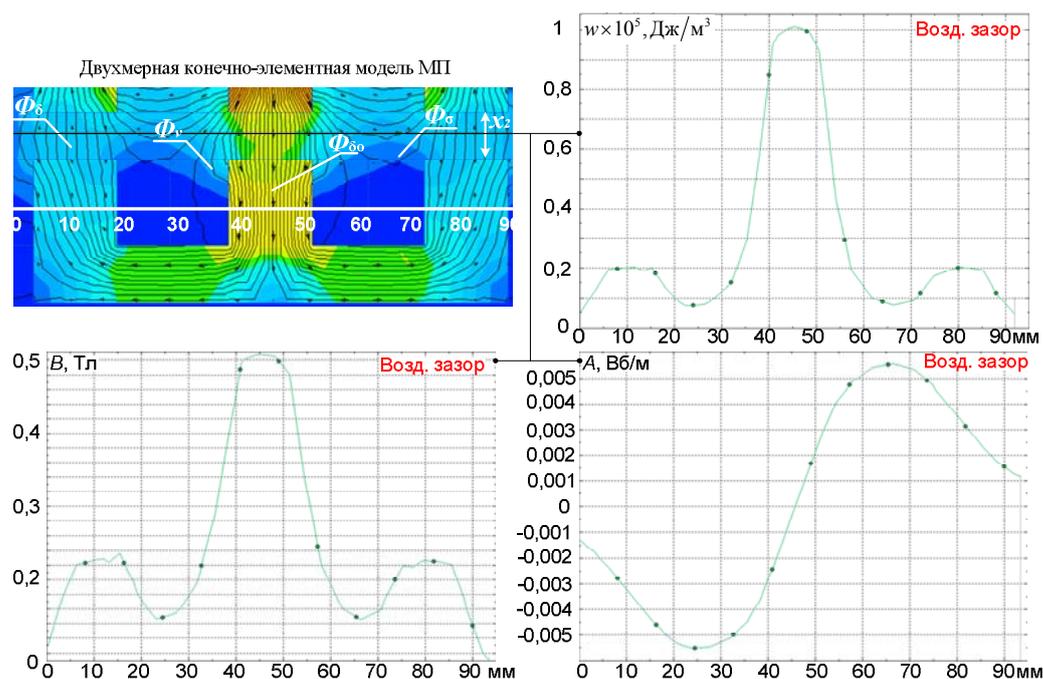


Рис. 7. Двухмерная конечно-элементная модель МП ЭГВПД с распределением вектора магнитной индукции ( $B$ ), вектора магнитного потенциала ( $A$ ) и плотности энергии МП ( $w$ ) в воздушном зазоре при  $x = 8,5$  мм

Анализ двухмерных конечно-элементных моделей МП магнитной системы ЭГВПД с продольным изменением магнитного потока и заданными источниками МП в виде обмоток с током и ПМ (рис. 1–7) показал, что в магнитной системе ЭГВПД существуют различные магнитные потоки:

1. Рабочий (основной) магнитный поток  $\Phi_{\delta_0}$ , содержащий в себе магнитный поток, сосредоточенный в воздушном зазоре между полюсами  $\Phi_{\delta}$ , и поток выпучивания  $\Phi_v$ . Данный магнитный поток сцепляется с витками рабочей обмотки (формирует потокосцепление) и имеет важное значение в процессе преобразования энергии.

2. Поток выпучивания  $\Phi_v$ , проходящий через воздушные промежутки по краям полюсов (стержней МПр) и замыкающийся по МПр. Данный магнитный поток также сцепляется с витками рабочей обмотки (формирует потокосцепление).

3. Поток рассеяния  $\Phi_{\delta}$  – это магнитный поток, который не сцепляется с витками рабочей обмотки генератора. Данный магнитный поток замыкается через воздушное пространство, минуя основной МПр [1].

**Эквивалентная схема магнитной цепи ЭГВПД с продольным изменением магнитного потока.** При построении эквивалентной схемы магнитной цепи и получении выражений для определения магнитных потоков через рабочую обмотку генератора был принят ряд традиционных допущений [10]–[12]: потери в МПр от вихревых токов и магнитное сопротивление МПр не учитываются; постоянный магнит стабилизирован, положение рабочей точки ПМ  $A_0$  (рис. 8) в процессе работы не меняется [1]; МПр не насыщен; не учитывается индуктивность рассеяния.

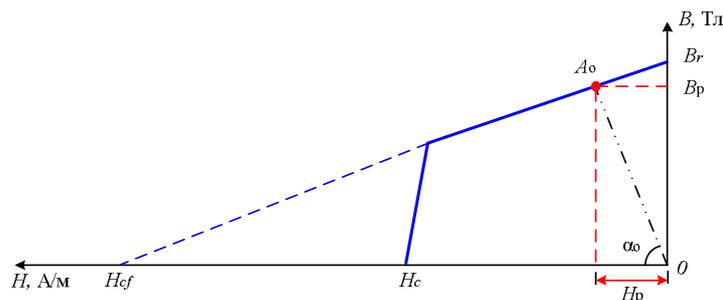


Рис. 8. Кривая размагничивания ПМ

На рис. 8 обозначено:  $B_r$  – остаточная индукция ПМ;  $A_0$  – рабочая точка ПМ в номинальном режиме работы генератора;  $B_p$  – магнитная индукция рабочей точки ПМ в номинальном режиме работы генератора;  $H_p$  – напряженность магнитного поля рабочей точки ПМ в номинальном режиме работы генератора;  $H_c$  – коэрцитивная сила по индукции;  $H_{cf}$  – фиктивная коэрцитивная сила.

С учетом выявленных в результате анализа двухмерных конечно-элементных моделей МП генератора основных магнитных потоков в ЭГВПД с продольным изменением магнитного потока, а также принятых допущений и симметрии конструкции (структуры) генератора ЭГВПД с продольным изменением магнитного потока (рис. 1) может быть поставлена в соответствие эквивалентная схема магнитной цепи (рис. 9). На рис. 9 представлена эквивалентная схема только верхней части магнитной системы ЭГВПД (рис. 1).

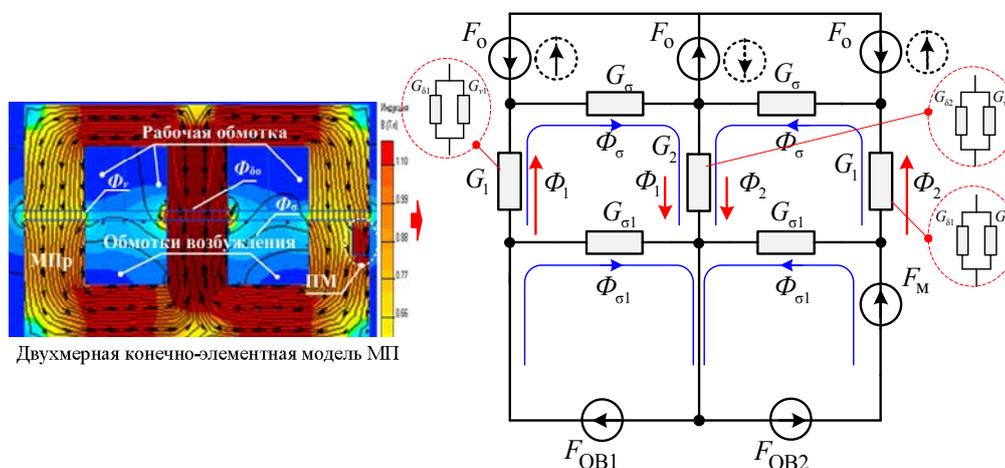


Рис. 9. Эквивалентная схема магнитной цепи ЭГВПД с продольным изменением магнитного потока

На рис. 9 обозначено:  $G_1 = G_{v1} + G_{\delta1}$  и  $G_2 = G_{v2} + G_{\delta2}$  – полные магнитные проводимости воздушных зазоров ЭГВПД;  $G_{v1}$  и  $G_{v2}$  – магнитные проводимости воздушных промежутков по путям потоков выпучивания ЭГВПД;  $G_{\delta1}$  и  $G_{\delta2}$  – магнитные проводимости воздушных зазоров ЭГВПД;  $G_\sigma$  и  $G_{\sigma1}$  – магнитные проводимости воздушных промежутков по путям потоков рассеяния в пазах рабочей обмотки и обмотки возбуждения ЭГВПД;  $F_0$  – магнитодвижущая сила (МДС) рабочей обмотки ЭГВПД;  $F_m$  – МДС ПМ;  $F_{OB1}$ ,  $F_{OB2}$  – МДС обмоток возбуждения ЭГВПД;  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$  – магнитные

потоки через рабочую обмотку ЭГВПД;  $\Phi_{\sigma}$ ,  $\Phi_{\sigma 1}$  – магнитные потоки рассеяния в пазах рабочей обмотки и обмотки возбуждения ЭГВПД.

На основе построенной эквивалентной схемы магнитной цепи (рис. 9) получены выражения для расчета магнитных потоков, проходящих через рабочую обмотку ЭГВПД с продольным изменением магнитного потока:

$$\Phi_1 = \frac{k'}{\sigma'} \left( \frac{G_{\delta 1} G_{\delta 2}}{G_{\delta 1} + G_{\delta 2}} \right) (F_{\text{ОВ1}} \mp 2F_0); \quad (1)$$

$$\Phi_2 = \frac{k'}{\sigma'} \left( \frac{G_{\delta 1} G_{\delta 2}}{G_{\delta 1} + G_{\delta 2}} \right) ((F_{\text{ОВ2}} + F_M) \mp 2F_0), \quad (2)$$

где  $\sigma'$  – коэффициент рассеяния магнитного потока в магнитной цепи ЭГВПД;  $k'$  – коэффициент выпучивания магнитного потока в магнитной цепи ЭГВПД.

Полученные выражения позволяют построить временные диаграммы магнитных потоков в магнитной системе ЭГВПД с продольным изменением магнитного потока, а также ЭДС в рабочей обмотке.

Результаты математического моделирования магнитных потоков  $\Phi_1, \Phi'_1, \Phi_2, \Phi'_2$  и электродвижущей силы (ЭДС)  $E$  в рабочей обмотке в режиме холостого хода представлены на рис. 10 и 11.  $\Phi_1(\Phi'_1)$ ,  $\Phi_2(\Phi'_2)$  – магнитные потоки через рабочую обмотку в верхней (нижней) части магнитной системы ЭГВПД (рис. 1). Условия построения временных диаграмм: частота перемещения подвижной части ( $f = 50$  Гц), максимальное значение магнитной индукции в МПр ( $B_{st \max} = 1,8$  Тл), максимальная плотность тока в обмотке возбуждения ( $J = 1 \cdot 10^7$  А/м<sup>2</sup>).

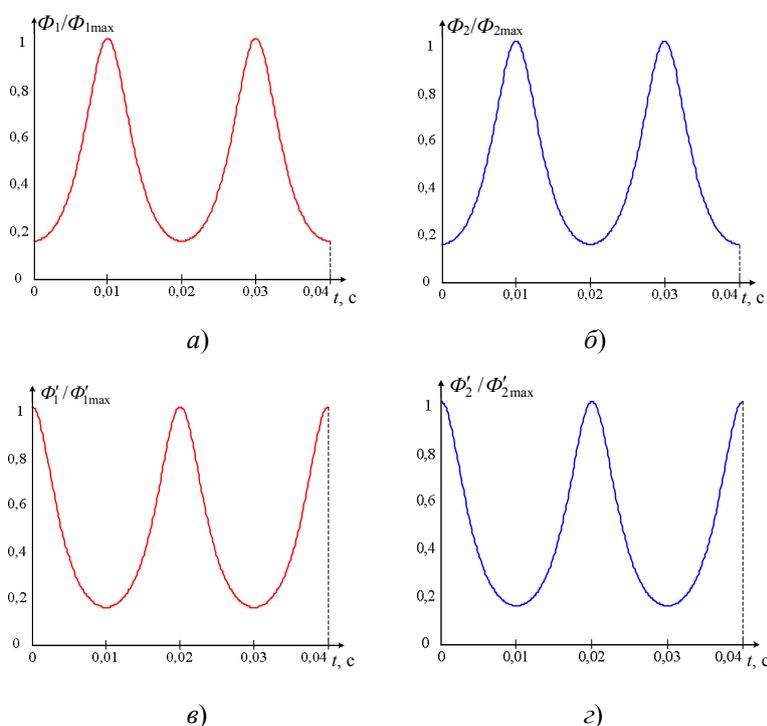


Рис. 10. Временные диаграммы:  
 а – магнитного потока  $\Phi_1$ ; б – магнитного потока  $\Phi_2$ ; в – магнитного потока  $\Phi'_1$ ; г – магнитного потока  $\Phi'_2$  ЭГВПД с продольным изменением магнитного потока

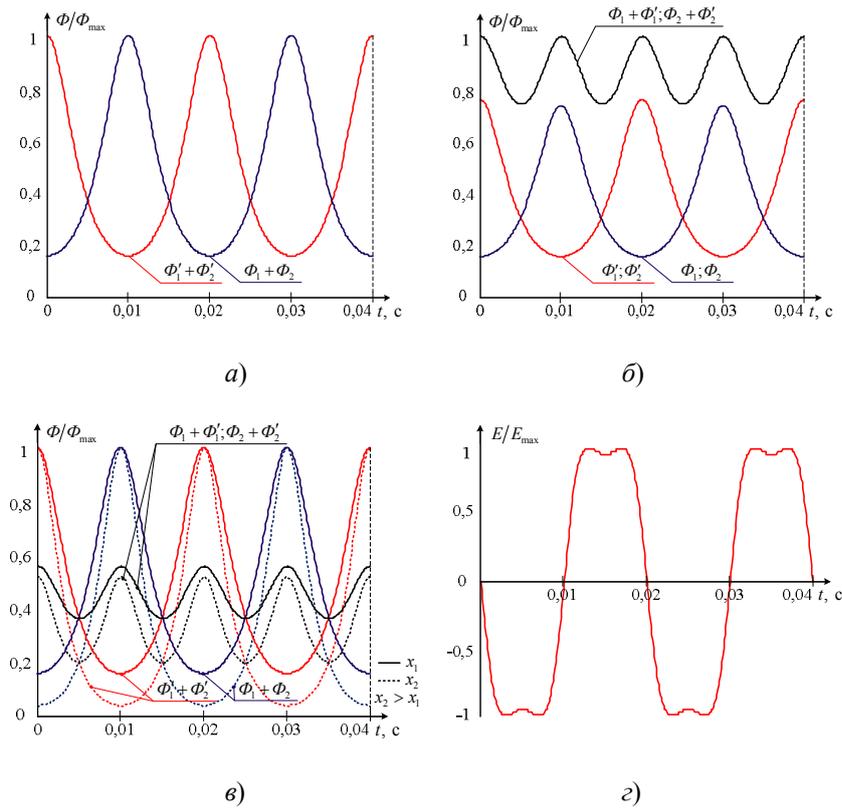


Рис. 11. Временные диаграммы:

а – магнитных потоков  $\Phi'_1 + \Phi'_2$ ;  $\Phi_1 + \Phi_2$ ;

б – магнитных потоков  $\Phi'_1$ ;  $\Phi'_2$ ;  $\Phi_1$ ;  $\Phi_2$ ;  $\Phi_1 + \Phi'_1$ ;  $\Phi_2 + \Phi'_2$ ;

в – магнитных потоков  $\Phi'_1 + \Phi'_2$ ;  $\Phi_1 + \Phi_2$ ;  $\Phi_1 + \Phi'_1$ ;  $\Phi_2 + \Phi'_2$ ;

г – ЭДС  $E$  ЭГВПД с продольным изменением магнитного потока

Из рис. 10 и 11 видно, что зависимости магнитных потоков через рабочую обмотку и обмотку возбуждения от величины рабочего хода  $x$  подвижной части генератора носят различный характер. При малых  $x$  эти зависимости близки к линейным, а с увеличением  $x$  эта линейность пропадает. Кроме того, необходимо отметить, что так как в симметричной структуре ЭГВПД (рис. 1) суммарная величина воздушных зазоров  $x_0 = x_1 + x_2$  при перемещении подвижной части генератора всегда остается постоянной, то скорость изменения во времени суммарного магнитного потока через обмотку возбуждения ( $\Phi_1 + \Phi'_1$ ;  $\Phi_2 + \Phi'_2$ ) уменьшается по сравнению с несимметричной структурой ЭГВПД (рис. 9), что приводит к уменьшению наводимой в обмотке возбуждения само- и взаимной индукции.

На основании анализа результатов моделирования генератора (рис. 1–7, 10, 11) и эквивалентной схемы магнитной цепи (рис. 9) предложена новая структура ЭГВПД с продольным изменением магнитного потока. За основу при разработке новой структуры ЭГВПД были взяты два известных ЭМПЭ возвратно-поступательного движения [13] и [14].

Недостатками генератора электроснабжения железнодорожного вагона [13] являются: низкий коэффициент полезного действия (КПД) из-за потерь от вихревых токов в статоре; уменьшение генерируемой мощности электрической энергии и искажение выходного напряжения из-за неравномерно изменяющейся величины воздушного зазора; низкая надежность работы устройства из-за расположения постоянных магнитов таким образом, что это приводит к их быстрому размагничиванию.

Наиболее близким техническим решением к предлагаемому является устройство для получения электрической энергии при механических колебаниях [14]. Недостатками устройства для получения электрической энергии при механических колебаниях являются: искажение выходного напряжения, уменьшение генерируемой мощности электрической энергии и снижение КПД из-за взаимовлияния силовой обмотки с обмоткой возбуждения; отсутствие возможности стабилизации величины выходного напряжения; малый объем нитей из магнитотвердого материала, что затрудняет процесс самовозбуждения устройства.

Вариант новой структуры ЭГВПД с продольным изменением магнитного потока представлен на рис. 12. Новизна технических решений структуры ЭГВПД защищена патентом Республики Беларусь на полезную модель [15].

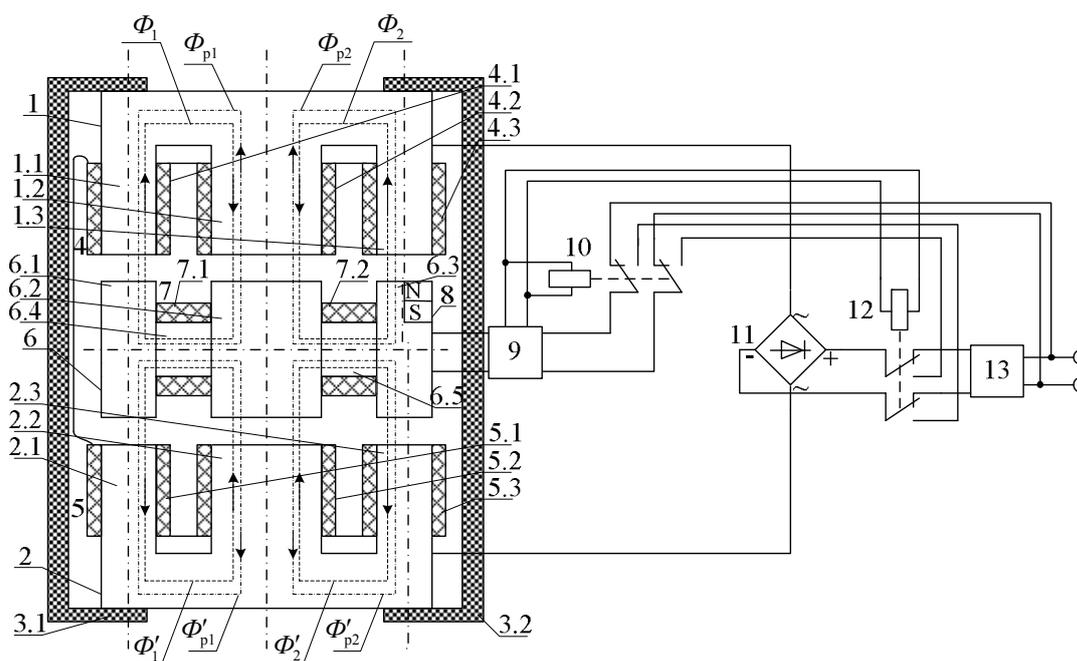


Рис. 12. Структура ЭГВПД с продольным изменением магнитного потока

Электрический генератор возвратно-поступательного движения с продольным изменением магнитного потока содержит (рис. 12): магнитную систему, состоящую из двух Ш-образных неподвижных МПР 1 и 2 якоря, площадь сечения центральных стержней 1.2 и 2.2 которых равна суммарной площади сечения боковых стержней 1.1, 1.3 и 2.1, 2.3 соответственно, и подвижного МПР 6 индуктора с обмоткой возбуждения 7, состоящей из двух одинаковых частей 7.1, 7.2 обмотки возбуждения 7, расположенной между двумя Ш-образными неподвижными МПР 1 и 2 якоря, выполненными из листов электротехнической стали и соединенными между собой двумя изолирующими каркасами 3.1, 3.2; сечение стержней 1.1, 1.2, 1.3, 2.1, 2.2, 2.3 двух Ш-образных неподвижных МПР 1 и 2 якоря имеет вид квадрата, на стержнях 1.1–1.3, 2.1–2.3 расположены только якорные обмотки 4 и 5 соответственно, каждая из которых состоит из трех частей 4.1–4.3 и 5.1–5.3 якорных обмоток 4 и 5 соответственно, расположенных на стержнях 1.1–1.3 и 2.1–2.3 двух Ш-образных неподвижных МПР 1 и 2 якоря соответственно, подвижный МПР 6 индуктора выполнен из листов электротехнической стали в виде трех стержней 6.1–6.3, сечение которых имеет вид квадрата, расположенных симметрично по отношению к центральному стержню 6.2, площадь сечения которого равна суммарной площади сечения боковых

стержней 6.1, 6.3, и соединенных между собой магнитными перемычками 6.4, 6.5 из листов электротехнической стали так, что подвижный МПр 6 индуктора представляет собой Ж-образный МПр, ПМ 8, блок управления самовозбуждением 9, реле 10 и 12, диодный мостовой выпрямитель 11, стабилизатор напряжения 13.

Части 4.1–4.3 якорной обмотки 4 соединены между собой последовательно согласно, аналогичным образом соединены между собой части 5.1–5.3 якорной обмотки 5, а сами якорные обмотки (рабочие обмотки) 4 и 5 соединены между собой последовательно встречно и подключены к входу диодного мостового выпрямителя 11, выход которого через реле 12 подключен к входу стабилизатора напряжения 13, выход которого является выходом ЭГВПД и через реле 10 подключен к входу блока управления самовозбуждением 9, выход которого подключен к обмотке возбуждения 7, одинаковые части 7.1 и 7.2 обмотки возбуждения 7 соединены последовательно встречно. Постоянный магнит 8 размещен в одном из стержней подвижного МПр 6 индуктора. Постоянный магнит 8, блок управления самовозбуждением 9 и реле 10, 12 обеспечивают гарантируемое самовозбуждение ЭГВПД. Стабилизатор напряжения 13 обеспечивает стабилизацию величины выходного напряжения.

Генератор собран таким образом, что оси стержней подвижного МПр 6 индуктора и двух Ш-образных неподвижных МПр 1 и 2 якоря совпадают, а сумма величин воздушных зазоров, между торцами стержней 1.1–6.1, 1.2–6.2, 1.3–6.3, 2.1–6.1, 2.2–6.2, 2.3–6.3 двух Ш-образных неподвижных МПр 1 и 2 якоря и подвижного МПр 6 индуктора всегда постоянна. Площадь сечения центральных стержней 1.2 и 2.2 двух Ш-образных неподвижных МПр 1 и 2 якоря и центрального стержня 6.2 подвижного МПр 6 индуктора равна суммарной площади сечения их боковых стержней 1.1, 1.3, 2.1, 2.3 и 6.1, 6.3 соответственно. Постоянный магнит 8 размещается таким образом, что векторы магнитной индукции, наводимые обмоткой возбуждения 7 и постоянным магнитом 8, совпадают. Возвратно-поступательное движение подвижный МПр 6 индуктора совершает в одной плоскости вдоль осей стержней 6.1–6.3 подвижного МПр 6 индуктора и стержней 1.1–1.3, 2.1–2.3 двух Ш-образных неподвижных МПр 1 и 2 якоря.

Электрический генератор возвратно-поступательного движения с продольным изменением магнитного потока (рис. 12) работает следующим образом. Постоянные магнитные потоки  $\Phi_1, \Phi_1'$  и  $\Phi_2, \Phi_2'$  одинаковых частей 7.1 и 7.2 обмотки возбуждения 7 соответственно замыкаются по магнитным цепям: «магнитная перемычка 6.4 – стержень 6.1 – воздушный зазор – стержень 1.1 – стержень 1.2 – воздушный зазор – стержень 6.2 – магнитная перемычка 6.4»; «магнитная перемычка 6.4 – стержень 6.1 – воздушный зазор – стержень 2.1 – стержень 2.2 – воздушный зазор – стержень 6.2 – магнитная перемычка 6.4» и «магнитная перемычка 6.5 – стержень 6.3 – воздушный зазор – стержень 1.3 – стержень 1.2 – воздушный зазор – стержень 6.2 – магнитная перемычка 6.5»; «магнитная перемычка 6.5 – стержень 6.3 – воздушный зазор – стержень 2.3 – стержень 2.2 – воздушный зазор – стержень 6.2 – магнитная перемычка 6.5» соответственно.

При совершении подвижным МПр 6 индуктора, представляющим собой Ж-образный МПр возвратно-поступательного движения, происходит изменение величины воздушных зазоров между торцами стержней 1.1–6.1, 1.2–6.2, 1.3–6.3 и 2.1–6.1, 2.2–6.2, 2.3–6.3, сечение которых имеет вид квадрата, но суммарная величина воздушных зазоров между торцами стержней 1.1–6.1, 1.2–6.2, 1.3–6.3 и 2.1–6.1, 2.2–6.2, 2.3–6.3 при этом всегда остается постоянной. Изменение величины воздушных зазоров между торцами стержней 1.1–6.1, 1.2–6.2, 1.3–6.3 и 2.1–6.1, 2.2–6.2, 2.3–6.3 вызывает изменение магнитных проводимостей магнитных цепей: «магнитная перемычка 6.4 – стержень 6.1 – воздушный зазор – стержень 1.1 – стержень 1.2 – воздушный зазор –

стержень 6.2 – магнитная перемычка 6.4»; «магнитная перемычка 6.4 – стержень 6.1 – воздушный зазор – стержень 2.1 – стержень 2.2 – воздушный зазор – стержень 6.2 – магнитная перемычка 6.4» и «магнитная перемычка 6.5 – стержень 6.3 – воздушный зазор – стержень 1.3 – стержень 1.2 – воздушный зазор – стержень 6.2 – магнитная перемычка 6.5»; «магнитная перемычка 6.5 – стержень 6.3 – воздушный зазор – стержень 2.3 – стержень 2.2 – воздушный зазор – стержень 6.2 – магнитная перемычка 6.5». Изменение магнитных проводимостей магнитных цепей вызывает продольное изменение во времени постоянных магнитных потоков  $\Phi_1, \Phi'_1$  и  $\Phi_2, \Phi'_2$  одинаковых частей 7.1 и 7.2 обмотки возбуждения 7, замыкающихся по магнитным цепям. Изменяющиеся во времени постоянные магнитные потоки  $\Phi_1, \Phi'_1$  и  $\Phi_2, \Phi'_2$  одинаковых частей 7.1 и 7.2 обмотки возбуждения 7 наводят в частях 4.1–4.3 и 5.1–5.3 якорных обмоток 4 и 5, ЭДС. Затем выпрямленное диодным мостовым выпрямителем 11 напряжение поступает через реле 12 на вход стабилизатора напряжения 13, который стабилизирует величину выходного напряжения. Выходное напряжение также через реле 10 и блок управления самовозбуждением 9 поступает на обмотку возбуждения 7, одинаковые части 7.1 и 7.2 обмотки возбуждения 7 формируют постоянные магнитные потоки  $\Phi_1, \Phi'_1$  и  $\Phi_2, \Phi'_2$  соответственно.

Из-за того, что суммарная величина воздушных зазоров между торцами стержней 1.1–6.1, 1.2–6.2, 1.3–6.3 и 2.1–6.1, 2.2–6.2, 2.3–6.3 при движении подвижного МПр 6 индуктора, представляющего собой Ж-образный МПр, всегда остается постоянной, скорость изменения во времени суммарных магнитных потоков  $\Phi_{p1} + \Phi'_{p1}$  и  $\Phi_{p2} + \Phi'_{p2}$ , созданных индуцированным током в частях 4.1–4.3 и 5.1–5.3 якорных обмоток 4 и 5 соответственно и замыкающихся по магнитным цепям: «магнитная перемычка 6.4 – стержень 6.1 – воздушный зазор – стержень 1.1 – стержень 1.2 – воздушный зазор – стержень 6.2 – магнитная перемычка 6.4»; «магнитная перемычка 6.4 – стержень 6.1 – воздушный зазор – стержень 2.1 – стержень 2.2 – воздушный зазор – стержень 6.2 – магнитная перемычка 6.4» и «магнитная перемычка 6.5 – стержень 6.3 – воздушный зазор – стержень 1.3 – стержень 1.2 – воздушный зазор – стержень 6.2 – магнитная перемычка 6.5»; «магнитная перемычка 6.5 – стержень 6.3 – воздушный зазор – стержень 2.3 – стержень 2.2 – воздушный зазор – стержень 6.2 – магнитная перемычка 6.5» соответственно, а также суммарных постоянных магнитных потоков  $\Phi_1 + \Phi'_1$  и  $\Phi_2 + \Phi'_2$  уменьшается, что приводит к уменьшению наводимой в обмотке возбуждения 7 ЭДС самоиндукции на 6,5 % и взаимоиндукции на 25,3 %, а следовательно к уменьшению взаимовлияния якорных обмоток 4 и 5 с обмоткой возбуждения 7 [15].

Режим самовозбуждения при запуске генератора осуществляется следующим образом. При запуске генератора блок управления самовозбуждением 9 через реле 10 и 12 подключает свой вход к выходу диодного мостового выпрямителя 11. Постоянный магнит 8 формирует постоянный магнитный поток. Возвратно-поступательное движение подвижного МПр 6 индуктора, представляющего собой Ж-образный МПр, приводит к изменению постоянного магнитного потока ПМ 8 через якорные обмотки 4 и 5, в результате чего в якорных обмотках 4 и 5 генерируется ЭДС. Выпрямленное диодным мостовым выпрямителем 11 напряжение поступает через реле 10, 12 и блок управления самовозбуждением 9 в обмотку возбуждения 7, вследствие чего создаются постоянные магнитные потоки  $\Phi_1, \Phi'_1$  и  $\Phi_2, \Phi'_2$  одинаковых частей 7.1 и 7.2 обмотки возбуждения 7 соответственно, которые усиливают магнитный поток от ПМ 8, из-за чего растет напряжение и на выходе диодного мостового выпрямителя 11. После завершения режима самовозбуждения блок управления самовозбуждением 9 через реле 10 и 12 подключает свой вход к выходу стабилизатора напряжения 13.

Предложенная новая структура ЭГВПД с продольным изменением магнитного потока может быть использована в качестве устройства, преобразующего механическую энергию возвратно-поступательного движения в электроэнергию.

### **Заключение**

Таким образом, в результате моделирования МП ЭГВПД с продольным изменением магнитного потока с помощью МКЭ выявлены основные магнитные потоки в магнитной системе ЭГВПД с продольным изменением магнитного потока и заданными источниками МП в виде обмоток с током и ПМ, а также построена эквивалентная схема магнитной цепи генератора. С учетом эквивалентной схемы магнитной цепи генератора получены выражения для расчета магнитных потоков, проходящих через рабочую обмотку ЭГВПД с продольным изменением магнитного потока. На основании полученных выражений проведено математическое моделирование магнитных потоков, проходящих через рабочую обмотку и обмотку возбуждения генератора, а также ЭДС в рабочей обмотке в режиме холостого хода. На основании анализа результатов моделирования генератора предложена новая структура ЭГВПД с продольным изменением магнитного потока, новизна технических решений которой защищена патентом Республики Беларусь на полезную модель [15].

Полученные выражения (1) и (2) могут служить основой для разработки математической модели нового ЭГВПД с продольным изменением магнитного потока на основе уравнений Кирхгофа с целью его дальнейшего исследования и оценки эффективности применения для преобразования механической энергии возвратно-поступательного движения в электрическую энергию.

Вышеуказанные результаты практически использовались в ОАО «ВОЛАТАВТО» в качестве методологической основы при проработке технического облика перспективных комплексов автономного электроснабжения, что подтверждено актом о практическом использовании, выданным ОАО «ВОЛАТАВТО».

### **Литература**

1. Хитерер, М. Я. Синхронные электрические машины возвратно-поступательного движения : учеб. пособие / М. Я. Хитерер, И. Е. Овчинников. – СПб. : Корона принт, 2013. – 357 с.
2. Пинский, Ф. И. Энергоустановки со свободнопоршневыми двигатель-генераторами / Ф. И. Пинский // Бортвая энергетика. – 2004. – № 2. – С. 13–17.
3. 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.
4. Темнов, Э. С. Разработка теоретических основ расчета и конструирования мало-размерных двигатель – генераторных установок как единой динамической системы : дис. ... канд. техн. наук : 05.04.02 / Э. С. Темнов. – Тула, 2005. – 134 л.
5. 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.
6. 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.
7. Тракторы XXI века: состояние и перспективы / С. Н. Поддубно [и др.]. – Минск : Белорус. наука, 2019. – 207 с.

8. Менжинский, А. Б. Анализ структур электрических генераторов возвратно-поступательного движения / А. Б. Менжинский, А. Н. Малашин, П. Б. Менжинский // Изобретатель. – Режим доступа: <https://izobretatel.by/nauchnye-publikacii/analiz-struktur-elektricheskikh-generatorov/>. – Дата доступа: 27.03.2020.
9. ELCUT Моделирование электромагнитных, тепловых и упругих полей методом конечных элементов. Версия 6.3.1 : рук. пользователя. – СПб. : Тор, 2018. – Режим доступа: [https://elcut.ru/downloads/manual\\_r\\_pocket.pdf](https://elcut.ru/downloads/manual_r_pocket.pdf). – Дата доступа: 24.05.2018.
10. Вольдек, А. И. Электрические машины : учебник / А. И. Вольдек. – 3-е изд., перераб. – Л. : Энергия, 1978. – 832 с.
11. Балагуров, В. А. Проектирование специальных электрических машин переменного тока : учеб. пособие / В. А. Балагуров. – М. : Высш. шк., 1982. – 272 с.
12. Балагуров, В. А. Электрические генераторы с постоянными магнитами / В. А. Балагуров, Ф. Ф. Галтеев. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.
13. Генератор электроснабжения железнодорожного вагона : пат. RU 2185980 : MKU В 61D 3/00 / К. К. Ким, А. А. Ермолаев ; заявитель Петерб. гос. ун-т путей сообщения. – № 2001118956128 ; заявл. 06.07.2001 ; опубл. 27.07.2002.
14. Устройство для получения электрической энергии при механических колебаниях : пат. RU 2468491, H02K 35/04, B60K 25/10 / Ф. Ф. Пащенко, В. В. Торшин, Л. Е. Круковский ; заявитель Федер. ин-т пром. собственности, отд-ние ВПТБ ; опубл. 27.11.2012.
15. Устройство для получения электрической энергии при возвратно-поступательном движении : пат. 12236 Респ. Беларусь : МПК H 02K 35/00 (2006) / А. Б. Менжинский, Ю. В. Суходолов, А. Н. Малашин, В. В. Майлычко, П. Б. Менжинский ; опубл. 28.02.2020 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2020. – № 1 (132). – С. 147.

*Получено 20.07.2020 г.*