

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-4-291-302>

УДК 621.313

Разработка уточненных электромагнитных моделей электрических генераторов возвратно-поступательного движения с постоянными магнитами

А. Б. Менжинский¹⁾, А. Н. Малашин¹⁾, П. Б. Менжинский²⁾

¹⁾Военная академия Республики Беларусь (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Гродненский государственный университет имени Я. Купалы (Гродно, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. Анализ научных работ, посвященных математическому описанию электрических генераторов возвратно-поступательного движения с постоянными магнитами, показал, что предлагаемые математические модели такого типа генераторов основываются на теории магнитных цепей (упрощенном представлении о магнитной системе и магнитном поле в виде магнитной цепи с соответствующими проводимостями). Однако в отличие от традиционных электрических машин вращательного типа электрические генераторы возвратно-поступательного движения обладают рядом особенностей, опущение которых при моделировании увеличивает затраты на их создание за счет продолжительности проектирования и экспериментальной доработки. Поэтому на начальных этапах электромагнитного расчета и решения задач оптимизации требуется применение адекватных математических моделей. С этой целью может использоваться моделирование на основе теории поля, однако основным его недостатком является сложность применения для решения задач оптимизации. Для повышения точности расчетов параметров электрических генераторов возвратно-поступательного движения с постоянными магнитами предлагается использовать в математических моделях на основе теории магнитных цепей уточняющие коэффициенты рассеяния и выпучивания магнитного потока. Авторами разработаны уточненные электромагнитные модели указанных генераторов, позволяющие вычислить основные параметры на начальных этапах электромагнитного расчета и решения задач оптимизации с высокой степенью соответствия. Отличительной особенностью уточненных электромагнитных моделей генераторов является учет зависимости коэффициентов рассеяния и выпучивания магнитного потока от координаты подвижной части и площади поперечного сечения магнитопровода.

Ключевые слова: математическая модель, электрический генератор возвратно-поступательного движения, теория магнитных цепей, теория поля, метод конечных элементов

Для цитирования: Менжинский, А. Б. Разработка уточненных электромагнитных моделей электрических генераторов возвратно-поступательного движения с постоянными магнитами / А. Б. Менжинский, А. Н. Малашин, П. Б. Менжинский // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2021. Т. 64, № 4. С. 291–302. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-4-291-302>

Адрес для переписки

Менжинский Андрей Борисович
Военная академия Республики Беларусь
просп. Независимости, 220
220057, г. Минск, Республика Беларусь
Тел. +375 17 235-39-49
volna05011990@mail.ru

Address for correspondence

Menzhinskiy Andrey B.
Military Academy of the Republic of Belarus
220, Nezavisimosty Ave.,
220057, Minsk, Republic of Belarus
Tel. +375 17 235-39-49
volna05011990@mail.ru

Development of Refined Electromagnetic Models of Reciprocating Electric Generators with Permanent Magnets

A. B. Menzhinski¹, A. N. Malashin¹, P. B. Menzhinski²

¹Military Academy of the Republic of Belarus (Minsk, Republic of Belarus),

²Yanka Kupala State University of Grodno (Grodno, Republic of Belarus)

Abstract. The analysis of scientific papers devoted to the mathematical description of electric generators of reciprocating motion with permanent magnets demonstrated that the proposed mathematical models of this type of generators are based on the theory of magnetic circuits. Such mathematical models are based on a simplified representation of the magnetic system and the magnetic field in the form of a magnetic circuit with corresponding magnetic conductivities. However, unlike traditional rotary type electric machines, electric generators of reciprocating motion have a number of features, the omission of which in mathematical modeling causes the increase of the cost of their creation (due to the duration of the design and experimental refinement of the generators). Therefore, at the initial stages of electromagnetic calculation and solving optimization problems, it is necessary to use adequate mathematical models to improve the accuracy of calculations of the parameters of these generators. For this purpose, a mathematical model based on field theory can be used; however, its main drawback is the complexity of its application for solving optimization problems. In this regard, to improve the accuracy of calculations of the parameters of electric generators of reciprocating motion with permanent magnets, it is proposed to use refining coefficients (coefficients of scattering and buckling of the magnetic flux) in mathematical models based on the theory of magnetic circuits. The authors have developed refined electromagnetic models of electric generators of reciprocating motion with permanent magnets, which make it possible to obtain the main parameters of generators at the initial stages of electromagnetic calculation and when solving optimization problems with acceptable accuracy. A distinctive feature of the refined electromagnetic models of generators is the consideration of the scattering and buckling coefficients of the magnetic flux in the magnetic system that change during the simulation.

Keywords: mathematical model, electric generator of reciprocating motion, theory of magnetic circuits, field theory, finite element method

For citation: Menzhinski A. B., Malashin A. N., Menzhinski P. B. (2021) Development of Refined Electromagnetic Models of Reciprocating Electric Generators with Permanent Magnets. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 64 (4), 291–302. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-4-291-302> (in Russian)

Введение

Математическому описанию электрических генераторов возвратно-поступательного движения (ЭГВПД) с постоянными магнитами посвящено достаточное количество работ. Их анализ [1–6] показывает, что математические модели (ММ), описывающие электромагнитные процессы в ЭГВПД, базируются на теории магнитных цепей (на основе уравнений Кирхгофа). Такие модели широко применяются в инженерных расчетах для определения параметров и характеристик ЭГВПД на начальных этапах проектирования.

Построенные на базе цепных методов ММ удобно использовать при решении задач оптимизации. Методы теории магнитных цепей основаны на упрощенном представлении о магнитной системе и магнитном поле в виде магнитной цепи с соответствующими магнитными проводимостями [1, 6]. Недостаточная точность таких моделей увеличивает затраты на создание ЭГВПД за счет продолжительности проектирования и экспериментальной доработки генераторов. Поэтому на начальных этапах электромагнитного расчета и решения задач оптимизации необходима более адекватная ММ, например на основе уравнений Кирхгофа и Пуассона

для векторного магнитного потенциала [7–9], базирующаяся на теории поля. Основным недостатком такого типа ММ является сложность ее применения.

Постановка задачи

Разработка уточненных моделей ЭГВПД с постоянными магнитами, позволяющих получить с приемлемой точностью значения основных параметров генераторов на начальных этапах электромагнитного расчета и решения задач оптимизации, имеет особую актуальность.

При математическом моделировании ЭГВПД на основе уравнений Кирхгофа принимается ряд традиционных допущений [10–15]: потери в магнитопроводе от вихревых токов не учитываются; сопротивление воздушного зазора значительно больше сопротивления магнитопровода (магнитное сопротивление магнитопровода не учитывается); постоянный магнит стабилизирован, положение рабочей точки в процессе работы не меняется; магнитопровод не насыщен; индуктивность рассеяния контуров не учитывается. Кроме того, дополнительно приняты условия функционирования ЭГВПД: однофазное исполнение; линейная нагрузка.

Разработка уточненных электромагнитных моделей

В ЭГВПД с числом постоянных магнитов n , формирующих магнитный поток через k -й контур, потокоцепление k -го контура

$$\Psi_k = i_k L_{kk} + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq k}}^s \Psi_{kn}^{\text{ПМ}}, \quad (1)$$

где i_k – ток k -го контура; L_{kk} – собственная индуктивность k -го контура;

$\sum_{\substack{n=1 \\ n \neq k}}^s \Psi_{kn}^{\text{ПМ}}$ – потокоцепление k -го контура, обусловленное n -м постоянным магнитом.

С учетом (1) и второго закона Кирхгофа для электрических цепей запишем уравнение электрического равновесия [1, 14] для k -го контура ЭГВПД

$$R_k i_k + L_{kk} \frac{di_k}{dt} + i_k \frac{dL_{kk}}{dt} + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq k}}^s \frac{d\Psi_{kn}^{\text{ПМ}}}{dt} = 0, \quad (2)$$

где R_k – активное сопротивление k -го контура.

Выделяя нагрузку и преобразуя уравнение (2) в соответствии с правилами дифференцирования, запишем его в виде

$$i_k R_{0k} + i_k R_n + L_n \frac{di_k}{dt} + L_{0k} \frac{di_k}{dt} + i_k \frac{dL_{0k}}{dt} + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq k}}^s \left(v_r \frac{d\Psi_{kn}^{\text{ПМ}}}{dx} \right) = 0, \quad (3)$$

где R_{0k} – активное сопротивление рабочей обмотки k -го контура генератора; R_n – то же нагрузки; L_n – индуктивность нагрузки; L_{0k} – собствен-

ная индуктивность k -го контура; $v_r = dx/dt$ – скорость перемещения подвижной части генератора.

Выражению (3) с учетом принятых допущений и условий функционирования генератора может быть поставлена в соответствие эквивалентная электрическая схема ЭГВПД, представленная на рис. 1, где E_k – ЭДС движения k -го контура; $U_{нк}$ – напряжение нагрузки k -го контура ($U_{нк} = i_k R_n + L_n (di_k/dt)$) [1, 14].

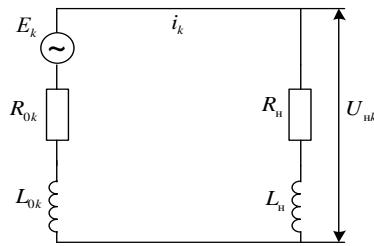


Рис. 1. Эквивалентная электрическая схема k -го контура электрического генератора возвратно-поступательного движения

Fig. 1. Equivalent electrical diagram of the k -th circuit of a magnetolectric reciprocating generator

Собственная индуктивность k -го контура определяется по выражению [1]

$$L_{0k} = (\Phi_{i_k} w_k) / i_k, \quad (4)$$

где Φ_{i_k} – магнитный поток через k -й контур, созданный током k -го контура i_k ; w_k – количество витков k -го контура.

Потокоцепление k -го контура, обусловленное n постоянными магнитами [1]:

$$\sum_{\substack{n=1 \\ n \neq k}}^s \Psi_{kn}^{\text{ПМ}} = \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq k}}^s w_k \Phi_{kn}^{\text{ПМ}}, \quad (5)$$

где $\Phi_{kn}^{\text{ПМ}}$ – магнитный поток через k -й контур, обусловленный n -м постоянным магнитом.

Учитывая, что магнитный поток равен произведению магнитодвижущей силы и магнитной проводимости по пути потока [1], запишем магнитный поток через k -й контур:

– обусловленный n -м постоянным магнитом:

$$\Phi_{kn}^{\text{ПМ}} = F_n^{\text{ПМ}} G_{\Phi_n^{\text{ПМ}}}, \quad (6)$$

где $F_n^{\text{ПМ}}$ – магнитодвижущая сила n -го постоянного магнита; $G_{\Phi_n^{\text{ПМ}}}$ – магнитная проводимость воздушного промежутка по пути магнитного потока n -го постоянного магнита $\Phi_n^{\text{ПМ}}$,

– созданный током k -го контура i_k :

$$\Phi_{i_k} = F_k G_{\Phi_{i_k}}, \quad (7)$$

где $F_k = w_k i_k$ – магнитодвижущая сила k -го контура; $G_{\Phi_{i_k}}$ – магнитная проводимость воздушного промежутка по пути потока Φ_{i_k} .

Существует множество методов расчета магнитных проводимостей магнитной цепи [13, 16]. Для расчета магнитных проводимостей ЭГВПД поперечного и продольного типов, как правило, используется метод вероятных путей потока (метод Ротерса), получивший распространение благодаря своей наглядности и простоте применения [1, 16]. При расчете магнитных проводимостей воздушных зазоров ЭГВПД продольного типа с помощью метода Ротерса используются расчетные выражения, применяемые к электромагнитам [17, 18] как наиболее близким по конструктивным признакам преобразователям. Кроме того, в [17, с. 52–53] путем математической обработки экспериментальных данных на основе принципа подобия А. Г. Сливинской получены зависимости, выражающие суммарную внешнюю магнитную проводимость воздушных зазоров для квадратных и цилиндрических полюсов. Однако в отличие от традиционных электрических машин вращательного типа ЭГВПД обладают рядом особенностей (неравномерность распределения магнитного потока в воздушном зазоре магнитной системы, переменный характер воздушного зазора между подвижной и неподвижной частями [1]), учет которых имеет важное значение при исследовании и проектировании генератора. Поэтому для повышения адекватности моделирования ЭГВПД предложено использовать в ММ на основе уравнений Кирхгофа уточняющие коэффициенты магнитных потоков выпучивания k и рассеяния σ , полученные с помощью метода конечных элементов [19]. С учетом сказанного запишем магнитный поток через k -й контур:

– обусловленный n -м постоянным магнитом:

$$\Phi_{kn}^{\text{ПМ}} = \frac{k}{\sigma} F_n^{\text{ПМ}} G_{\Phi_n^{\text{ПМ}}}; \quad (8)$$

– созданный током k -го контура i_k :

$$\Phi_{i_k} = \frac{k}{\sigma} F_k G_{\Phi_{i_k}}. \quad (9)$$

Следовательно, собственная индуктивность k -го контура примет вид

$$L_{0k} = \frac{k}{\sigma} w_k^2 G_{\Phi_{i_k}}. \quad (10)$$

В [19, 20] изложен порядок получения уточняющих коэффициентов σ , k для ЭГВПД и представлены уточняющие коэффициенты $\sigma(S_{\text{МПр}}, x)$, $k(S_{\text{МПр}}, x)$, полученные для ЭГВПД продольного типа, в зависимости от координаты перемещения x подвижной части и площади поперечного сечения магнитопровода $S_{\text{МПр}}$. Разработанный ранее подход [8, 19, 20] основан на использовании в ММ $\sigma(S_{\text{МПр}}, x)$, $k(S_{\text{МПр}}, x)$ при заданных $S_{\text{МПр}}$ и x . То есть в процессе моделирования при изменении $S_{\text{МПр}}$ или x необходимо делать пересчет коэффициентов σ и k , что не очень удобно на начальных

этапах электромагнитного расчета и решения задач оптимизации генераторов. Кроме того, в [21] выявлено, что существенное влияние на значения коэффициентов рассеяния и выпучивания оказывают $S_{МПр}$ и x . Анализ выражений (8)–(10) показывает, что если не учесть этот факт, погрешность расчетов параметров ЭГВПД увеличится.

С учетом анализа результатов математического моделирования ЭГВПД [8, 9, 15, 19–21] в данной статье предложены два новых подхода к использованию в ММ на основе уравнений Кирхгофа уточняющих коэффициентов $\sigma(S_{МПр}, x)$, $k(S_{МПр}, x)$: 1) при изменении координаты подвижной части $x = \text{var}$ и заданной площади поперечного сечения магнитопровода $S_{МПр} = S_{МПр1} - S_{МПрn}$; 2) при $x = \text{var}$ и $S_{МПр} = \text{var}$.

Для пояснения реализации первого подхода предлагается использовать полученные ранее уточняющие коэффициенты $\sigma(S_{МПр}, x)$, $k(S_{МПр}, x)$ для ЭГВПД продольного типа [20], на которых строятся зависимости σ от x и k от x при $S_{МПр} = S_{МПр1} - S_{МПрn}$, $x = \text{var}$ (рис. 2, 3). Такие зависимости могут быть получены для любого типа ЭГВПД путем многократного построения двумерной конечно-элементной модели магнитного поля (рис. 4) [19].

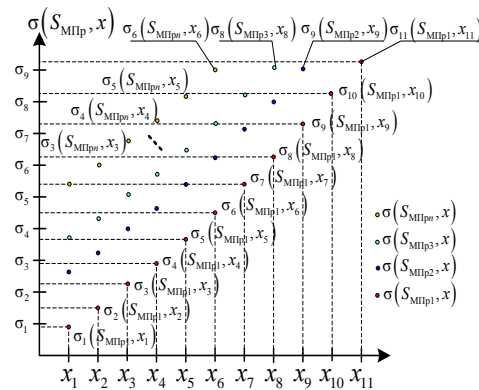


Рис. 2. Зависимость σ от x
при $S_{МПр} = S_{МПр1} - S_{МПрn}$, $x = \text{var}$

Fig. 2. Dependence of σ on x
by $S_{МПр} = S_{МПр1} - S_{МПрn}$, $x = \text{var}$

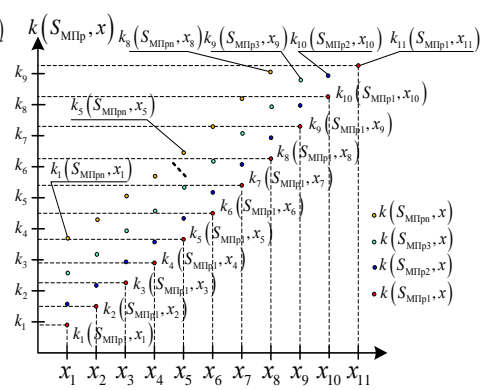


Рис. 3. Зависимость k от x
при $S_{МПр} = S_{МПр1} - S_{МПрn}$, $x = \text{var}$

Fig. 3. Dependence of k on x
by $S_{МПр} = S_{МПр1} - S_{МПрn}$, $x = \text{var}$

Далее путем полиномиальной аппроксимации ($n = 3$) рассчитанных коэффициентов σ , k (рис. 2, 3) при $S_{МПр} = S_{МПр1} - S_{МПрn}$, $x = \text{var}$ получены выражения:

$$\sigma_n(S_{МПрn}, x) = a_0 x^3 + a_1 x^2 + a_2 x + a_3, \quad (11)$$

$$n \in N; a_0, a_1, a_2, a_3 \in R;$$

$$k_n(S_{МПрn}, x) = a_0 x^3 + a_1 x^2 + a_2 x + a_3, \quad (12)$$

$$n \in N; a_0, a_1, a_2, a_3 \in R,$$

где N – множество натуральных чисел; a_0, a_1, a_2, a_3 – коэффициенты; R – множество действительных чисел.

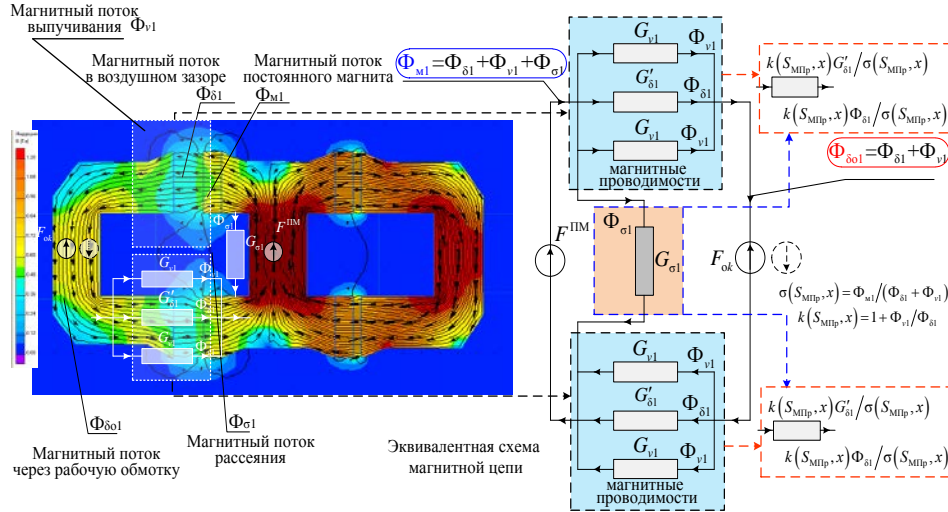


Рис. 4. Двухмерная конечно-элементная модель магнитного поля электрического генератора возвратно-поступательного движения с продольным изменением магнитного потока

Fig. 4. Two-dimensional finite element model of the magnetic field of an electric generator of reciprocating motion with a longitudinal alteration in the magnetic flux

Степень полинома n определяет точность расчета σ, k . Выражения (11) и (12) показывают зависимость σ, k от x при $S_{МПр} = S_{МПр1} - S_{МПрn}$ и позволяют использовать в ММ на основе уравнений Кирхгофа изменяющиеся в процессе моделирования $\sigma(S_{МПр}, x), k(S_{МПр}, x)$ при $x = \text{var}$, $S_{МПр} = S_{МПр1} - S_{МПрn}$. С учетом полученных коэффициентов $\sigma_n(S_{МПрn}, x), k_n(S_{МПрn}, x)$ и выражений (8), (10) уравнение (3) можно записать в виде

$$i_k R_{0k} + i_k R_H + L_H \frac{di_k}{dt} + \left(\frac{k_n w_k^2 G_{\Phi_{ik}}}{\sigma_n} \right) \frac{di_k}{dt} +$$

$$+ i_k \frac{d}{dt} \left(\frac{k_n w_k^2 G_{\Phi_{ik}}}{\sigma_n} \right) + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq k}}^s \left(v_\Gamma \frac{d}{dx} \left(\frac{k_n w_k F_n^{\text{ПМ}} G_{\Phi_n^{\text{ПМ}}}}{\sigma_n} \right) \right) = 0. \quad (13)$$

Второй подход реализуется в среде MatLab-Simulink за счет использования блока Look-Up Table 2-D (рис. 5).

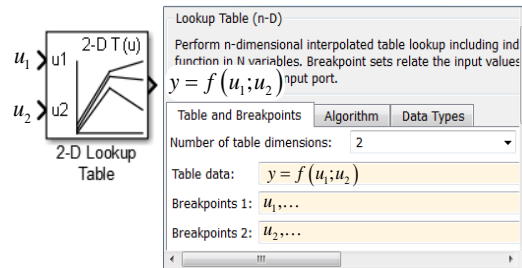


Рис. 5. Блок Look-Up Table 2-D

Fig. 5. Look-Up Table 2-D block

Порядок формирования числового состава таблицы блока Look-Up Table 2-D

Путем многократного построения двухмерной конечно-элементной модели магнитного поля [19] ЭГВПД при $S_{МПр} = \text{var}$, $x = \text{var}$ (рис. 4) формируется числовой состав таблицы блока Look-Up Table 2-D, включающий значения отношения $k(S_{МПр}, x) / \sigma(S_{МПр}, x)$ при $S_{МПр} = \text{var}$, $x = \text{var}$. В качестве примера на рис. 6 представлены диалоговые окна блока Look-Up Table 2-D при $S_{МПр1}$, $S_{МПр2}$, $S_{МПр3}$ и x_1 , x_2 , x_3 . Шаги изменения $S_{МПр}$, x определяют точность расчета $k(S_{МПр}, x) / \sigma(S_{МПр}, x)$.

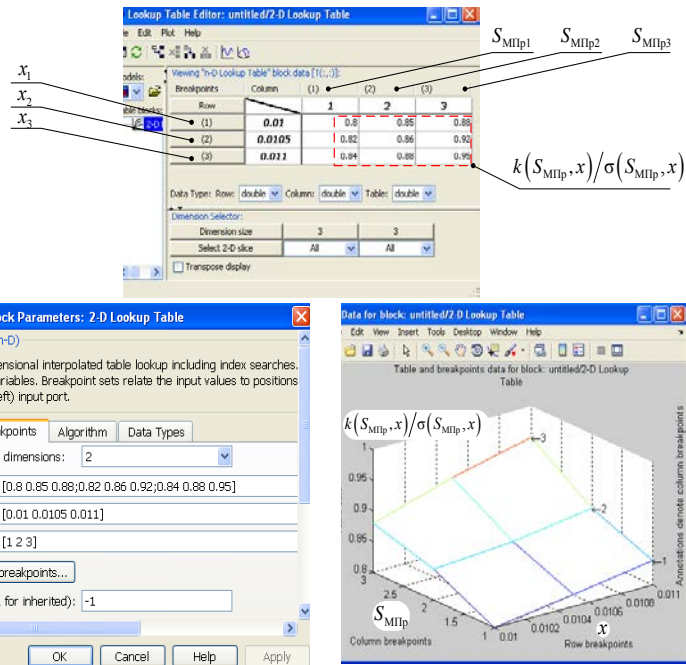


Рис. 6. Диалоговые окна блока Look-Up Table 2-D

Fig. 6. Dialog boxes of the Look-Up Table 2-D block

Данный подход позволяет использовать в ММ на основе уравнений Кирхгофа изменяющиеся в процессе моделирования $\sigma(S_{МПр}, x)$, $k(S_{МПр}, x)$ при $x = \text{var}$, $S_{МПр} = \text{var}$. Для его реализации на основе (3), (5), (10) в среде MatLab-Simulink разработана имитационная модель ЭГВПД, структурная схема которой представлена на рис. 7.

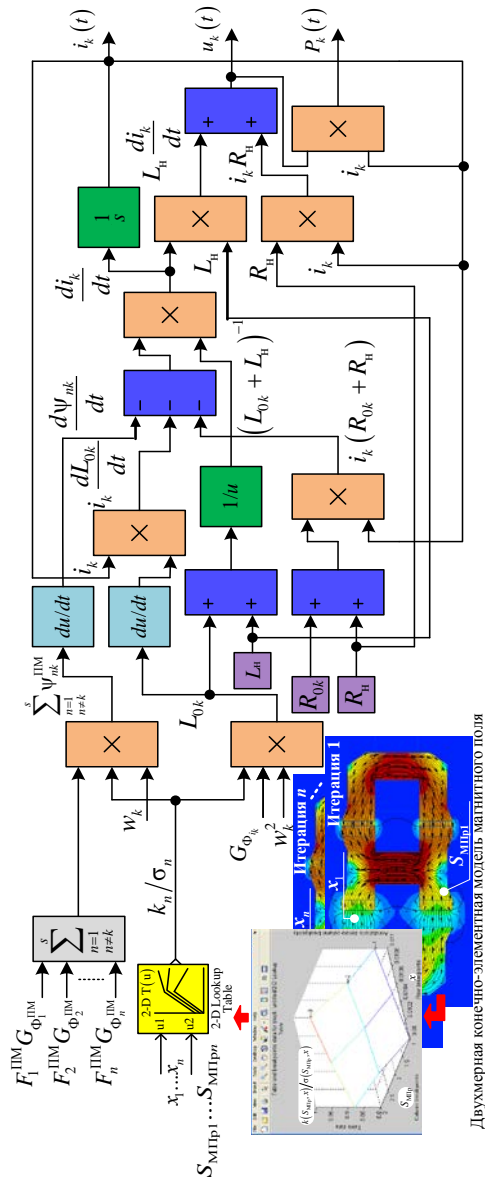


Рис. 7. Структурная схема имитационной модели электрического генератора возвратно-поступательного движения с постоянными магнитами

Fig. 7. Block diagram of a simulation model of a reciprocating electric generator with permanent magnets

Разработанная имитационная модель ЭГВПД с постоянными магнитами позволяет получить мгновенные значения тока $i_k(t)$, напряжения $u_k(t)$ и мощности $P_k(t)$ в цепи генератора с учетом зависимости коэффициентов рассеяния и выпучивания магнитного потока от координаты подвижной части и площади поперечного сечения магнитопровода.

ВЫВОДЫ

1. Обоснована необходимость применения и предложены новые подходы к использованию в математических моделях электрических генераторов возвратно-поступательного движения на основе уравнений Кирхгофа, применяемых на начальных этапах электромагнитного расчета и в решении задач оптимизации генераторов, уточняющих коэффициентов рассеяния и выпучивания магнитного потока.

2. Разработаны уточненные электромагнитные модели электрических генераторов возвратно-поступательного движения с постоянными магнитами, учитывающие зависимость коэффициентов рассеяния и выпучивания магнитного потока от координаты подвижной части и площади поперечного сечения магнитопровода, которые позволят получить основные параметры генераторов на начальных этапах электромагнитного расчета и в решении задач оптимизации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хитерер, М. Я. Синхронные электрические машины возвратно-поступательного движения / М. Я. Хитерер, И. Е. Овчинников. СПб.: Корона принт, 2013. 368 с.
2. Саттаров, Р. Р. Исследование установившегося режима синхронного генератора возвратно-поступательного движения / Р. Р. Саттаров, Н. Л. Бабилова, Е. А. Полихач // Вестн. Уфим. гос. авиац. техн. ун-та. 2007. Т. 9, № 6. С. 194–199.
3. Сергеевкова, Е. В. Синхронная электрическая машина возвратно-поступательного движения (генератор) / Е. В. Сергеевкова. М., 2011. 118 л.
4. Тарашев, С. А. Вентильный линейный генератор для систем электропитания автономных объектов / С. А. Тарашев. Самара, 2011. 129 л.
5. Темнов, Э. С. Разработка теоретических основ расчета и конструирования малоразмерных двигатель-генераторных установок как единой динамической системы / Э. С. Темнов. Тула, 2005. 134 л.
6. Бабилова, Н. Л. Генератор возвратно-поступательного движения в автономной системе электроснабжения маломощных потребителей / Н. Л. Бабилова. Уфа, 2009. 147 л.
7. Синицин, А. П. Совершенствование линейных генераторов с постоянными магнитами для автономных объектов / А. П. Синицин. Самара, 2013. 124 л.
8. Менжинский, А. Б. Математическая модель генератора комбинированной конструкции возвратно-поступательного типа / А. Б. Менжинский, А. Н. Малашин, Ю. Г. Коваль // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. 2018. № 2. С. 74–85.
9. Менжинский, А. Б. Экспериментальная проверка адекватности математической модели возвратно-поступательного электрического генератора с электромагнитным возбуждением / А. Б. Менжинский, А. Н. Малашин, Ю. В. Суходолов // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 2. С. 168–176. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-168-176>.
10. Вольдек, А. И. Электрические машины / А. И. Вольдек. 3-е изд., перераб. Л.: Энергия, 1978. 832 с.
11. Балагуров, В. А. Проектирование специальных электрических машин переменного тока / 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. Буль, Б. К. Основы теории и расчета магнитных цепей / Б. К. Буль. М.; Л.: Энергия, 1964. 464 с.
14. Иванов-Смоленский, А. В. Электрические машины / А. В. Иванов-Смоленский. М.: Энергия, 1980. 928 с.
15. Менжинский, А. Б. Разработка и анализ математических моделей генераторов линейного и возвратно-поступательного типов с электромагнитным возбуждением / А. Б. Менжинский, А. Н. Малашин, Ю. В. Суходолов // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 2. С. 118–128. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-2-118-128>.
16. Теория электрических аппаратов / Г. Н. Александров [и др.]; под ред. Г. Н. Александрова. 2-е изд., перераб. и доп. СПб.: Изд-во С.-Петерб. политехн. ун-та, 2000. 540 с.
17. Основы теории электрических аппаратов / И. С. Таев [и др.]; под ред. И. С. Таева. М.: Высш. шк., 1987. 351 с.
18. Лобов, К. Ф. Линейный электромагнитный привод малых перемещений / К. Ф. Лобов. Л., 1987. 200 л.
19. Экспериментальное исследование макета электромеханического преобразователя энергии возвратно-поступательного типа с продольным нелинейным изменением магнитного потока / А. Б. Менжинский [и др.] // Энергоэффективность. 2020. № 1. С. 24–29.
20. Менжинский, А. Б. Универсальная методика электромагнитного расчета возвратно-поступательных электрических генераторов с поперечным и продольным нелинейным изменением магнитного потока / А. Б. Менжинский, А. Н. Малашин, Ю. Г. Коваль // Изобретатель. 2019. № 5–6. С. 38–48.
21. Исследование электромагнитных процессов в возвратно-поступательных электрических генераторах с продольным и комбинированным нелинейным изменением магнитного потока / А. Б. Менжинский [и др.] // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. 2019. № 4. С. 45–59.

Поступила 18.08.2020 Подписана в печать 20.10.2020 Опубликовано онлайн 30.07.2021

REFERENCES

1. Khiterer M. Ya., Ovchinnikov I. E. (2013) *Synchronous Electric Reciprocating Machines*. St. Petersburg, Korona-Print Publ. 368 (in Russian).
2. Sattarov R. R., Babikova N. L., Polikhach E. A. (2007) Investigation of the Steady-State Mode of a Synchronous Reciprocating Motion Generator. *Vestnik UGATU*, (9) 6, 194–199 (in Russian).
3. Sergeenkova E. V. (2011) *Synchronous Electric Machine of Reciprocating Motion (Generator)*. Moscow. 118 (in Russian).
4. Tarashev S. A. (2011) *Valve Linear Generator for Power Supply Systems of Autonomous Objects*. Samara. 129 (in Russian).
5. Temnov E. S. (2005) *Development of Theoretical Bases for the Calculation and Design of Small-Sized Engine-Generator Sets as a Single Dynamic System*. Tula. 134 (in Russian).
6. Babikova N. L. (2009) *Generator of Reciprocating Motion in the Autonomous Power Supply System of Low-Power Consumers*. Ufa. 147 (in Russian).
7. Sinitsin A. P. (2013) *Improvement of Linear Generators with Permanent Magnets for Autonomous Objects*. Samara. 124 (in Russian).
8. Menzhinski A. B., Malashin A. N., Koval J. G. (2018) Mathematical Model of the Generator of the Combined Design of Reciprocating Type. *Vestnik Gomelskogo Technicheskogo Universiteta im. P. O. Sukhogo* [Bulletin of the Sukhoi State Technical University of Gomel], (2), 74–85 (in Russian).

9. Menzhinski A. B., Malashin A. N., Sukhodolov Yu. V. (2019) Experimental Verification of the Adequacy of Mathematical Model of the Reciprocating Electric Electromagnetically Excited Generator. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (2), 168–176. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-168-176> (in Russian).
10. Vol'dek A. I. (1978) *Electric Cars*. 3rd ed. Leningrad, Energiya Publ. 832 (in Russian).
11. Balagurov V. A. (1982) *Design of Special AC Electric Machines*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 272 (in Russian).
12. Balagurov V. A., Galteyev F. F. (1988) *Electric Machines with Permanent Magnets*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 280 (in Russian).
13. Bul' B. K. (1964) *Fundamentals of the Theory and Calculation of Magnetic Circuits*. Moscow, Leningrad, Energiya Publ. 464 (in Russian).
14. Ivanov-Smolenskii A. V. (1980) *Electrical Machines*. Moscow, Energiya Publ. 928 (in Russian).
15. Menzhinski A. B., Malashin A. N., Sukhodolov Yu. V. (2018) Developing and the Analysis of Mathematical Models of Generators of Linear and Reciprocating Types with Electromagnetic Excitation. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (2), 118–128. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-2-118-128> (in Russian).
16. Aleksandrov G. N., Borisov V. V., Ivanov V. L., Kaplan G. S., Karpenko L. N., Kukekov G. A., Tonkogenov E. N., Filippov Yu. A. (2000) *Theory of Electrical Apparatuses*. 2nd ed. St.-Petersburg, St.-Petersburg Polytechnic University Publ. 540 (in Russian).
17. Taev I. S., Bul' B. K., Godzhello A. G., Degtyar' V. G., Slivinskaya A. G., Chunikhin A. A. (1987) *Fundamentals of the Theory of Electrical Apparatuses*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 351 (in Russian).
18. Lobov K. F. (1987) *Linear Electromagnetic Drive of Small Displacements*. Leningrad. 200 (in Russian).
19. Menzhinski A. B., Menzhinski P. B., Malashin A. N., Sidyako O. V. (2020) Experimental Study of the Layout of an Electromechanical Reciprocating Type Energy Converter with a Longitudinal Nonlinear Change in the Magnetic Flux. *Energoeffektivnost' [Energy Efficiency]*, (1), 24–29 (in Russian).
20. Menzhinski A. B., Malashin A. N., Koval' Yu. G. (2019) Universal Method of Electromagnetic Calculation of Reciprocating Electric Generators Characterized by Transverse and Longitudinal Non-Linear Changes in Magnetic Flux. *Izobretatel' [Inventor]*, (5–6), 38–48 (in Russian).
21. Menzhinski A. B., Malashin A. N., Sidyako O. V., Menzhinski P. B. (2019) Investigation of Electromagnetic Processes in Reciprocating Electric Generators of Longitudinal and Combined Nonlinear Changes in the Magnetic Flux. *Vestnik Gomelskogo Technicheskogo Universiteta im. P. O. Sukhogo [Bulletin of the Sukhoi State Technical University of Gomel]*, (4), 45–59 (in Russian).