УДК 621.313

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГЕНЕРАТОРА КОМБИНИРОВАННОЙ КОНСТРУКЦИИ ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ТИПА

А. Б. МЕНЖИНСКИЙ, А. Н. МАЛАШИН, Ю. Г. КОВАЛЬ

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

Ключевые слова: комбинированный генератор возвратно-поступательного типа, возвратно-поступательный электрический генератор, свободнопоршневой двигатель, математическая модель.

Введение

Система энергоснабжения современных робототехнических комплексов требует разработки электромеханических преобразователей энергии с высокими энергетическими и минимальными массогабаритными показателями [1]. В связи с этим в промышленно развитых странах (США, России, Великобритании, Японии, ФРГ, Швеции, Нидерландах, Китае, Израиле и др.) в качестве перспективной энергоустановки рассматривается свободнопоршневой двигатель (СПД) с генератором [2]–[5].

Подобными энергоустановками на базе СПД в настоящее время занимается множество фирм и научных университетов, таких как: General Motors, Toyota Central, Sandia National Laboratories (*P.V. Blarigan*), NASA, Stirling Technology Company (США), Национальный университет науки и технологии Тайваня, университет Тянжина, прикладной институт науки и технологии Кореи, Стэндфордский университет, университет технологий Петронас, университет Ньюкасла и др. [5].

Основной особенностью такой системы является отсутствие кривошипно-шатунного механизма в конструкции двигателя. Это позволяет увеличить его КПД до 50–60 %, в 2,5–3 раза увеличить габаритную мощность, уменьшить удельную массу, металлоемкость СПД [2] и удельный расход топлива приводного двигателя на 30 %, реализовать модульную структуру, увеличить ресурс до капитального ремонта до 50 тыс. ч [3], [4].

В энергоустановках на базе СПД в качестве электрической машины чаще всего применяются возвратно-поступательные электрические генераторы с поперечным приращением магнитного потока (ВПЭГ с ПМП) [2]–[5]. Основным недостатком этих генераторов является отсутствие согласования электрической и механической подсистем в крайних точках рабочего цикла, что ограничивает эффективность использования СПД и снижает надежность энергоустановки.

В [6], [7] для решения проблемы согласования электрической и механической подсистем энергоустановки на базе СПД в крайних точках рабочего цикла было предложено использовать электромеханический преобразователь энергии с поперечным и продольным приращением магнитного потока (комбинированный генератор). Одна из возможных конструкций комбинированного генератора представлена на рис. 1.

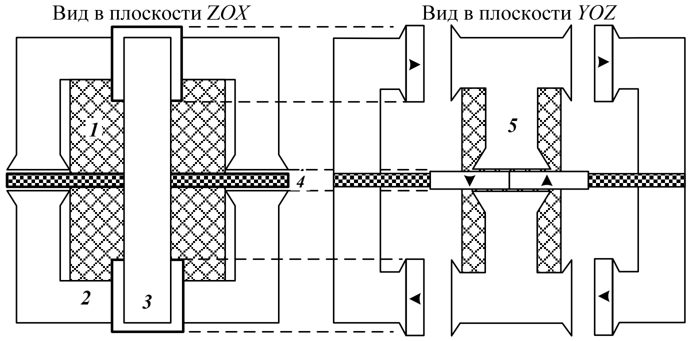


Рис. 1. Генератор комбинированной конструкции:
1 – рабочая обмотка; *2* – магнитопровод ВПЭГ поперечного типа;
3 – магнитопровод ВПЭГ продольного типа; *4* – изолятор;
5 – общий магнитопровод

Электромагнитная сила генератора комбинированной конструкции (ГКК) принимает максимальное значение в крайних точках рабочего цикла СПД. Благодаря этому появляется возможность обеспечения согласования электрической и механической подсистем энергоустановки на базе СПД на всем рабочем цикле.

Поэтому целью работы является математическое описание ГКК для его дальнейшего исследования и оценки эффективности применения в энергоустановке на базе СПД.

Основная часть

Математическому описанию ВПЭГ поперечного типа посвящено достаточное количество работ [2]–[5] в отличие от ВПЭГ продольного типа [6]–[8], анализ которых показал, что все они основываются на теории цепей (уравнениях Кирхгофа). Основное преимущество цепных методов заключается в том, что построенные на их основе математические модели (ММ) электрических машин позволяют получать ключевые характеристики за малый промежуток времени, поэтому они применяются в задачах оптимизации, позволяя перебирать множество вариантов за ограниченное время. Недостаточная точность таких моделей требует применения более сложных моделей для последующего уточнения полученного результата.

Однако в отличие от электромеханических преобразователей энергии (ЭМПЭ) вращательного типа, возвратно-поступательные преобразователи обладают рядом особенностей: неравномерностью распределения магнитного поля в воздушном зазоре зубцово-пазовой зоны; переменным характером воздушного зазора между подвижной и неподвижной частью генератора и в некоторых случаях разомкнутостью магнитопровода, учет которых имеет важное значение при проектировании возвратно-поступательных преобразователей энергии. Поэтому принятие некоторых упрощений (допущений), характерных для теории цепей, при математическом описании возвратно-поступательных преобразователей энергии может оказаться достаточно грубым приближением, что повлечет за собой неточности в вычислениях их характеристик. В связи с этим для исследования подобных ЭМПЭ целесообразно применять ММ на основе теории поля, использующие численные методы [9]. Это позволяет учесть специфику геометрии машины, насыщение участков магнитопровода, различие магнитных свойств среды, неравномерность воздушного зазора и другие особенности распределения магнитного поля [10], что позволяет описывать процессы, протекающие в возвратно-поступательных преобразователях с высокой достоверностью.

Электромагнитные процессы в ГКК описываются известными уравнениями Максвелла в дифференциальной форме [11], [12]:

$$\begin{cases} \operatorname{div} \vec{B} = 0; \\ \operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} + \dfrac{d\vec{D}}{dt}; \\ \operatorname{rot} \vec{E} = -\dfrac{d\vec{B}}{dt}; \\ \operatorname{div} \vec{D} = \rho, \end{cases} \tag{1}$$

где $\vec{B}$ – вектор магнитной индукции; $\vec{H}$ – векторы напряженности магнитного поля; $\vec{j}$ – вектор плотности тока; $\vec{E}$ – вектор напряженности электрического поля; $\vec{D}$ – вектор электрической индукции; ρ – объемная плотность электрических зарядов.

Основные четыре уравнения Максвелла необходимо дополнить системой уравнений, описывающих свойство материалов [11]:

$$\begin{cases} \vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H} = \mu_{\text{a}} \vec{H}; \\ \vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{E} = \varepsilon_{\text{a}} \vec{E}; \\ \vec{j} = \gamma \vec{E}, \end{cases} \tag{2}$$

где μ_0 – абсолютная магнитная проницаемость вакуума; μ – относительная магнитная проницаемость среды; μ_{a} – абсолютная магнитная проницаемость среды; ε_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума; ε – относительная диэлектрическая проницаемость среды; ε_{a} – абсолютная диэлектрическая проницаемость среды; γ – удельная электрическая проводимость среды.

В общем случае абсолютная магнитная проницаемость среды, связывающая между собой векторы напряженности и индукции магнитного поля, имеет различные значения по каждой оси [11].

Векторы электромагнитного поля ($\vec{B}$, $\vec{H}$, $\vec{E}$ и $\vec{j}$) являются функциями не только пространственных координат, но и времени. Причем во времени эти векторы изменяются по произвольному периодическому закону. При такой постановке задачи не удается получить из систем уравнений (1) и (2) аналитическое выражение, которое можно было бы использовать для дальнейших расчетов электромагнитного поля даже численными методами [11].

С учетом этого был принят ряд допущений относительно свойств магнитных материалов и характера протекания электромагнитных процессов.

Первым является допущение о стационарном характере поля. Источниками такого поля являются постоянные токи или постоянные магниты [13]. Стационарное магнитное поле можно рассматривать независимо от стационарного электрического и наоборот (они не влияют друг на друга) [10].

Второе допущение – ферромагнитные сердечники представляются средами с линейными или нелинейными, но изотропными свойствами ($\mu_x = \mu_y = \mu$). Это допущение свидетельствует о том, что свойства магнитопровода по различным осям одинаковы. В нелинейной постановке задачи свойства активных материалов ВПЭГ задаются зависимостью $B = f(H)$ [14].

Третье допущение – магнитная проницаемость постоянна по всей длине магнитопровода $(\mu = \text{const})$.

Четвертое допущение указывает на то, что действительное токораспределение рабочей обмотки заменяется расчетным с сохранением реальных геометрических размеров обмотки и реального значения ее намагничивающей силы.

Отдельно следует рассмотреть особенности расчета магнитных систем с постоянными магнитами, для которых связь между векторами индукции и напряженности целесообразно записывать через вектор остаточной индукции $\vec{B}_r$ [10]. При этом учитываются следующие допущения [11]:

– вектор остаточной индукции постоянного магнита отличается от нуля только по главной оси намагничивания;

– вектор остаточной индукции зависит только от напряженности магнитного поля по главной оси намагничивания;

– применительно к высококоэрцитивным постоянным магнитам (ПМ) вектор остаточной индукции принимается постоянным в пределах изменения напряженности магнитного поля от нуля до значения, равного коэрцитивной силе по индукции;

– магнитная проницаемость ПМ по всем координатам одинакова и равна магнитной проницаемости по главной оси намагничивания (для высококоэрцитивных ПМ принимается равной μ_0).

Всю магнитную систему ГКК рассмотрим в виде совокупности следующих областей: область рабочего воздушного зазора; область проводников с током; область магнитопровода; область постоянных магнитов.

С учетом принятых допущений магнитостатическая векторная модель магнитного поля (МП) ГКК на основе уравнений Максвелла приобретает вид:

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j}; \tag{3}$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0; \tag{4}$$

уравнение материальной связи:

$$\vec{B} = \mu_\text{а} \vec{H} + \vec{B}_r. \tag{5}$$

При построении модели на внутренних и внешних границах области задаются нижеперечисленные граничные условия [12].

Условие Неймана. Составляющие магнитного поля B и H можно найти при соблюдении граничных условий неразрывности нормальных и тангенциальных составляющих магнитного поля на границах раздела сред (условие Неймана) с различными магнитными проницаемостями μ^+ и μ^-:

– граничные условия неразрывности нормальных составляющих вектора индукции магнитного поля $B_n^+ = B_n^-$ (однородное условие Неймана);

– граничные условия неразрывности тангенциальных составляющих вектора напряженности магнитного поля $H_\tau^+ = H_\tau^-$ однородное условие Неймана).

Условие Дирихле позволяет задать на внешней границе модели наперед известный векторный магнитный потенциал $\vec{A}$. Это граничное условие характеризует поведение нормальной составляющей вектора индукции на границе модели B_n. В данной задаче зададим нулевое граничное условие Дирихле $B_n = 0,$ для указания полного затухания поля $(\vec{A} = 0)$ на удаленной от источников границе.

Возьмем ротор левой и правой части уравнения (5) и получим:

$$\mathrm{rot}\vec{B} = \mathrm{rot}\left(\mu_{\text{а}}\vec{H}\right) + \mathrm{rot}\,\vec{B}_r. \tag{6}$$

Условие непрерывности магнитных силовых линий $(\mathrm{div}\,\vec{B} = 0)$ позволяет ввести некоторую векторную функцию $\vec{A}$ (векторный магнитный потенциал) такую, что [10]:

$$\vec{B} = \mathrm{rot}\,\vec{A}. \tag{7}$$

Подставим уравнение $\mathrm{rot}\,\vec{H}$ из (3) и $\vec{B}$ из (7) в уравнение (6) и получим основное уравнение для расчета магнитостатического поля:

$$\mathrm{rot}\left(\mathrm{rot}\,\vec{A}\right) = \mu_{\text{а}}\vec{j} + \mathrm{rot}\,\vec{B}_r. \tag{8}$$

Уравнение (8) можно решить численным методом.

С учетом того, что [10]:

$$\mathrm{rot}\left(\mathrm{rot}\,\vec{A}\right) = \mathrm{grad}\left(\mathrm{div}\vec{A}\right) - \nabla^2\vec{A} \tag{9}$$

можно записать

$$\mathrm{grad}\left(\mathrm{div}\vec{A}\right) - \nabla^2\vec{A} = \mu_a\vec{j} + \mathrm{rot}\,\vec{B}_r. \tag{10}$$

Так как для магнитостатического поля линии вектора $\vec{A}$ замкнуты сами на себя, то $\mathrm{div}\vec{A} = 0.$ [12].

Тогда уравнение Пуассона для векторного магнитного потенциала примет вид:

$$\nabla^2\vec{A} = -\mu_{\text{а}}\vec{j} - \mathrm{rot}\,\vec{B}_r. \tag{11}$$

В двумерной плоскопараллельной задаче вектор индукции $\vec{B}$ всегда ориентирован в плоскости модели (x, y), а вектор плотности тока $\vec{j}$ и векторный потенциал $\vec{A}$ перпендикулярны к ней [13]. Это значит, что отличны от нуля только компоненты j_z и A_z. Таким образом, в декартовой системе координат уравнение (11) относительно векторного магнитного потенциала для магнитной системы ГКК примет вид:

$$\frac{1}{\mu}\left(\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2}\right) = -\mu_0 j_z - \frac{1}{\mu}\mathrm{rot}\,\vec{B}_r. \tag{12}$$

Уравнения (12) и граничные условия представляют двухмерную магнитостатическую векторную модель ГКК в плоскопараллельной постановке.

Для решения уравнения (12) при такой постановке задачи был выбран метод конечных элементов (МКЭ), реализованный в программном продукте *Elcut 5.1*. Программный продукт *Elcut 5.1* может применяться для решения линейных и нелинейных двумерных задач магнитостатики в плоскопараллельной и осесимметричной постановке, при этом используется формулировка задачи относительно векторного магнитного потенциала.

Имитируя движения подвижной части генератора с некоторым шагом dxm и интерполируя в программе *Matlab/Simulink* или *Mathcad* полученные значения потокосцепления на один виток k-го контура, определим мгновенные значения:

– ЭДС движения k-го контура:

$$E = -w_k \frac{d}{dt}\left(\frac{\oint A_{zk} ds}{S} \right), \tag{13}$$

где w_k – количество витков k-го контура; $1/S \oint A_{zk} ds$ – потокосцепление на один виток k-го контура.

Интегрирование в данной формуле ведется по поперечному сечению обмотки, а S обозначает площадь этого поперечного сечения;

– собственной индуктивности рабочей обмотки:

$$L_{0k} = \frac{w}{i_k} \frac{\oint A_{zk(i_k)} ds}{S}, \tag{14}$$

где $1/S \oint A_{zk(i_k)} ds$ – потокосцепление на один виток k-го контура, созданное током k-го контура i_k;

– взаимной индуктивности:

$$L_{nk} = \frac{w_k}{i_n} \frac{\oint A_{zk(i_n)} ds}{S}, \tag{15}$$

где $1/S \oint A_{zk(i_n)} ds$ – потокосцепление на один виток k-го контура, созданное током n-го контура i_n.

Разработанная магнитостатическая векторная модель ГКК на основе уравнений Максвелла позволяет получить мгновенные значения основных параметров $(E,\ L_0, L_{nk})$ ГКК с учетом принятых допущений и граничных условий, а также специфики геометрии магнитной системы генератора, нелинейности кривой намагничивания материалов, насыщения участков магнитопровода, различия магнитных свойств сред и неравномерности распределения магнитного потока в воздушном зазоре, что способствует повышению точности полученных результатов.

Таким образом, учесть реальную картину распределения магнитного поля в магнитной системе ГКК и одновременно получить мгновенные значения тока и напряжения при работе генератора в установившемся режиме на линейную нагрузку позволяет ММ, разработанная на основе уравнений Кирхгофа и Максвелла.

Уравнения электрического равновесия для k-го контура магнитоэлектрического ГКК (рис. 1) можно записать в виде:

$$\left(L_{0k} + L_{\text{н}}\right)\frac{di_k}{dt} + \left(R_{0k} + R_{\text{н}}\right)i_k + i_k \frac{dL_{ok}}{dt} + \sum_{n=1}^{s} \left.\frac{d\Psi_{kn(F_{\text{мп}})}}{dt}\right|_{k \neq n} = 0, \tag{16}$$

где $L_{\text{н}}$ – индуктивность нагрузки; R_{0k} – активное сопротивление k-го контура; $R_{\text{н}}$ – активное сопротивление нагрузки; $\sum_{n=1}^{s} \left.\frac{d\Psi_{kn(F_{\text{мп}})}}{dt}\right|_{k \neq n}$ – ЭДС движения k-го контура.

Уравнению электрического равновесия (16) может быть поставлена в соответствие эквивалентная электрическая схема (рис. 2).

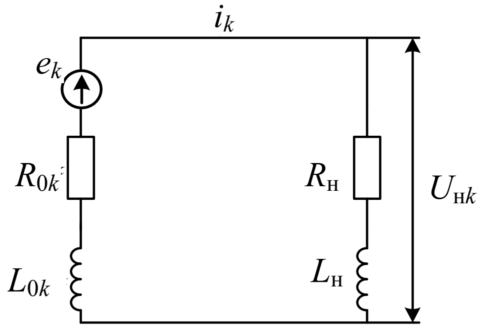


Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема ГКК при работе на линейную нагрузку

Напряжение нагрузки *k*-го контура можно записать в виде:

$$U_{нk} = R_н i_k + L_н \frac{di_k}{dt}. \tag{17}$$

Подставляя в (16) ЭДС движения и собственную индуктивность, полученные по выражениям (13) и (14), ММ ГКК при линейной нагрузке на основе уравнений Кирхгофа и Максвелла может быть представлена системой уравнений вида:

$$\begin{cases} \left(\frac{w_{0k}}{i_k}\frac{\oint A_{zk(i_k)}ds}{S}+L_н\right)\frac{di_k}{dt}+i_k\left(R_{0k}+R_н\right)+w_{0k}\frac{d}{dt}\left(\frac{\oint A_{zk(i_k)}ds}{S}\right)-w_{0k}\frac{d}{dt}\left(\frac{\oint A_{zk\left(F_{мn=1\ldots F_{Ms}}\right)}ds}{S}\right)=0; \\ U_{нk}=R_н i_k+L_н\frac{di_k}{dt}, \end{cases} \tag{18}$$

где $1/S\oint A_{zk\left(F_{мn=1\ldots F_{Ms}}\right)}ds$ – потокосцепление на один виток *k*-го контура, созданное *n*-м ПМ ($n = 1\ldots s$) и учитывающее продольное, поперечное или комбинированное приращения магнитного потока.

Для расчета собственной индуктивности *k*-го контура и потокосцепления на один виток *k*-го контура, созданного *n*-м ПМ $(n = 1\ldots s)$, необходимо решить уравнение Пуассона (12) относительно компоненты A_z векторного магнитного потенциала $\vec{A}$ с заданными граничными условиями для магнитной системы ГКК.

Вся магнитная система ГКК состоит из следующих областей: область рабочего воздушного зазора $(\Omega_{возд})$; область проводников с током $(\Omega_{ток})$; область магнитопровода $(\Omega_{ст})$; в магнитоэлектрических генераторах область постоянных магнитов $(\Omega_{магн})$.

Каждая область характеризуется присущими ей магнитными свойствами.

Геометрия двухмерной модели обобщенной магнитной системы магнитоэлектрического ГКК в плоскопараллельной постановке с граничными условиями представлена на рис. 3.

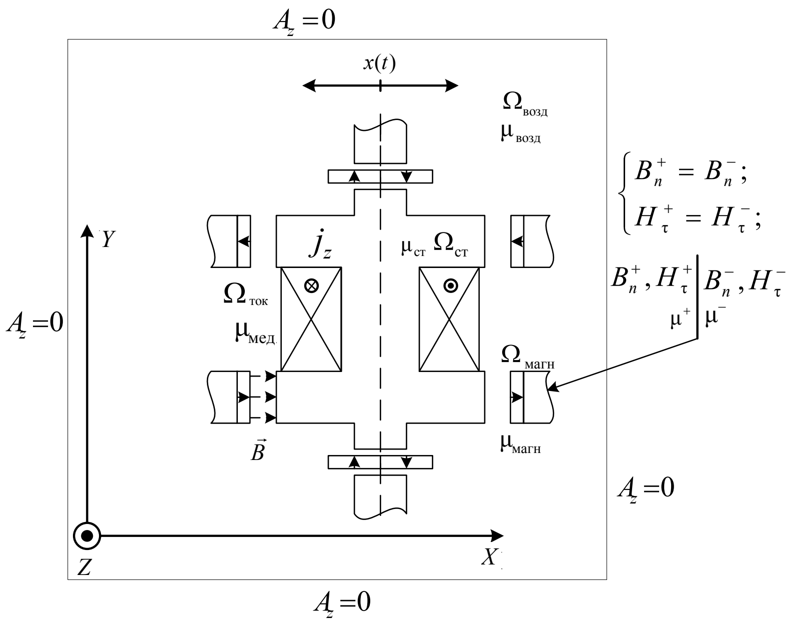


Рис. 3. Геометрия двухмерной модели обобщенной магнитной системы магнитоэлектрического ГКК в плоскопараллельной постановке с заданными граничными условиями

На основании (12) получим уравнения для каждой области магнитной системы ГКК:

– область постоянных магнитов $(\Omega_{\text{магн}})$:

$$\frac{1}{\mu_0}\left(\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2}\right) = -\frac{1}{\mu_0}\operatorname{rot}\vec{B}_r; \tag{19}$$

– область проводников с током $(\Omega_{\text{ток}})$:

$$\frac{1}{\mu_{\text{меди}}}\left(\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2}\right) = -j_z\mu_0; \tag{20}$$

– область рабочего воздушного зазора $(\Omega_{\text{возд}})$:

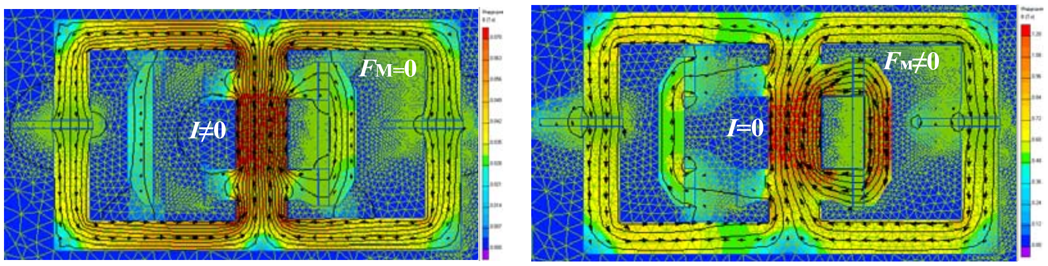
$$\frac{1}{\mu_{\text{в}}}\left(\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2}\right) = 0; \tag{21}$$

– область магнитопровода $(\Omega_{\text{ст}})$:

$$\frac{1}{\mu_{\text{ст}}}\left(\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2}\right) = 0. \tag{22}$$

Уравнения (19)–(22) и граничные условия представляют двухмерную магнитостатическую векторную модель ГКК в плоскопараллельной постановке, решение которых позволит определить компоненту A_z векторного магнитного потенциала $\vec{A}$ с заданными граничными условиями для каждой области магнитной системы магнитоэлектрического генератора комбинированного типа.

В программном продукте *Elcut 5.1* построена двухмерная конечно-элементная модель МП магнитоэлектрического генератора комбинированного типа (рис. 4).



а) *б*)

Рис. 4. Двухмерная конечно-элементная модель МП ГКК

Посредством имитации перемещения подвижной части генератора с некоторым шагом Δx двухмерная конечно-элементная модель МП магнитоэлектрического ГКК, представленная на рис. 4, *а*, позволяет получить дискретную функцию собственной индуктивности *k*-го контура, а на рис. 4, *б* – потокосцепления на один виток *k*-го контура, созданного *n*-м ПМ, а также значения коэффициентов рассеяния и выпучивания магнитного потока в магнитной системе генератора, в зависимости от координаты перемещения подвижной части генератора и геометрических размеров магнитной системы.

Интерполяция полученных значений собственной индуктивности и потокосцепление на один виток рабочей обмотки в программе *Elcut 5.1* была проведена в программе *Matlab/Simulink* с помощью кубического сплайна одномерной таблицы *Look-Up Table* [14], что позволило получить закон изменения во времени собственной индуктивности и потокосцепление на один виток рабочей обмотки при изменении координаты положения подвижной части генератора.

На основании полученных результатов и системы уравнений (18) разработана имитационная модель ГКК, структурная схема которой представлена на рис. 5.

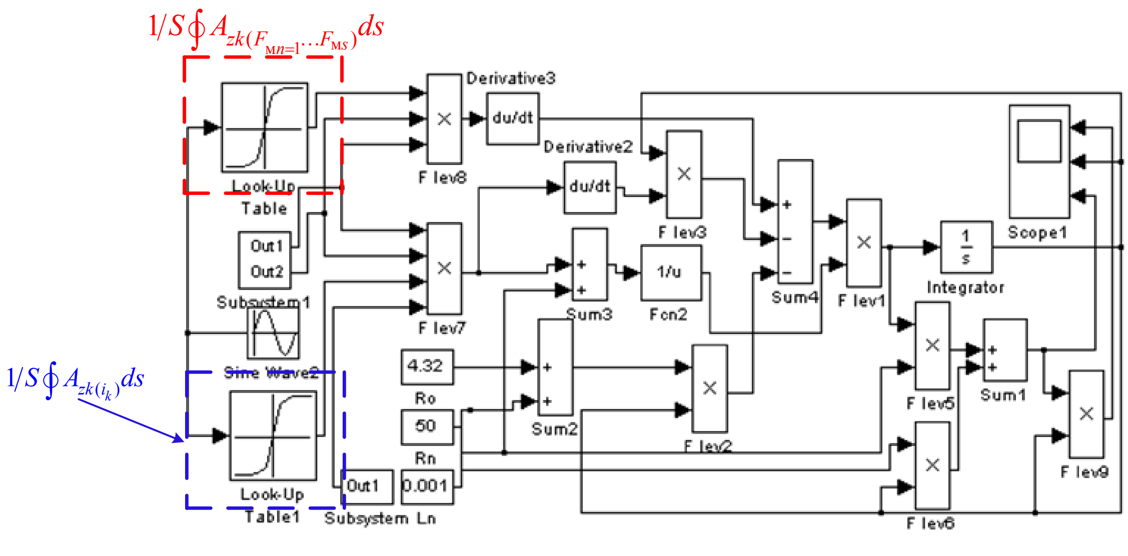


Рис. 5. Структурная схема имитационной модели ГКК

На рис. 6 представлены временные диаграммы мгновенных значений мощности, тока и напряжения на выходе ГКК, а также мгновенные значения мощности, тока и напряжения на выходе ГКК, полученные посредством ММ на основе уравнений Кирхгофа (16) и (17).

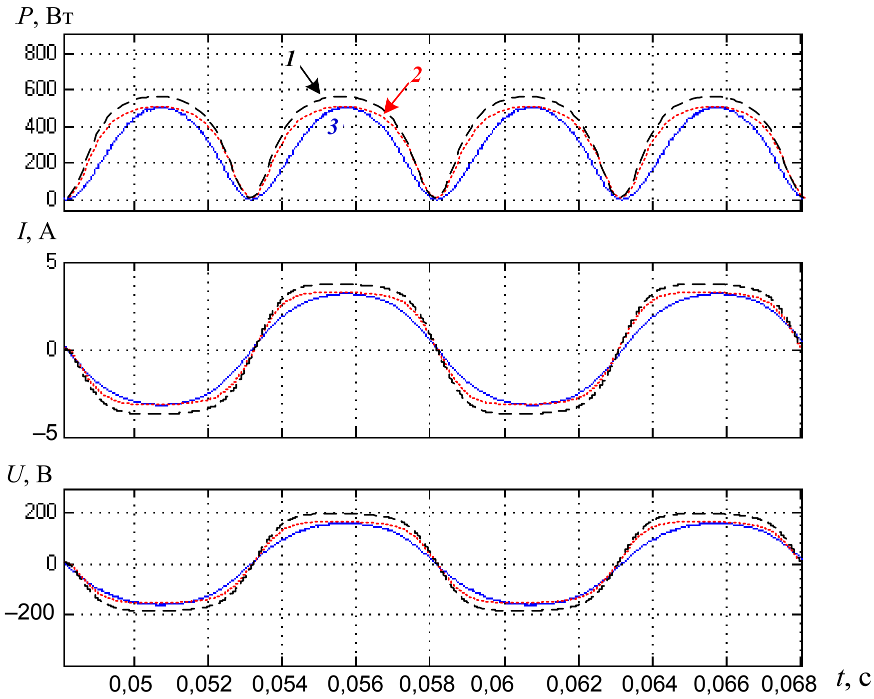
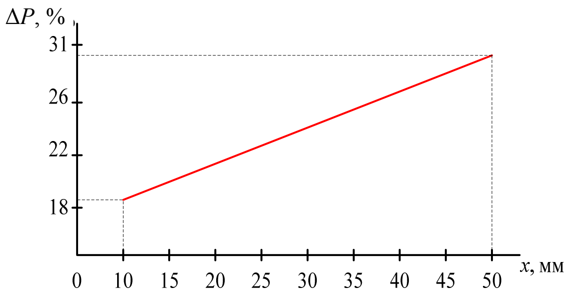


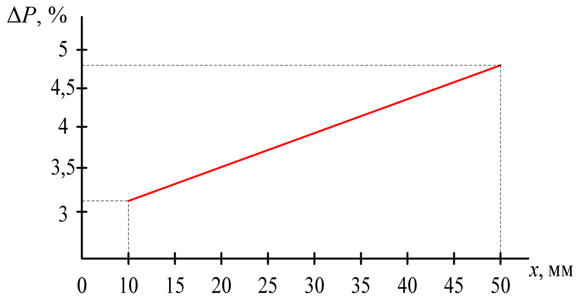
Рис. 6. Временные диаграммы мгновенной мощности, тока, напряжения на выходе ГКК при линейной нагрузке: *1* – линейная ММ на основе уравнений Кирхгофа с расчетом магнитных проводимостей воздушных зазоров по методу Ротерса; *2* – линейная ММ на основе уравнений Кирхгофа с уточняющими коэффициентами; *3* – нелинейная ММ на основе уравнений Кирхгофа и Максвелла

Под номером *1* представлены временные диаграммы, полученные посредством линейной ММ на основе уравнений Кирхгофа с расчетом магнитных проводимостей воздушных зазоров по методу Ротерса. Под номером *2* даны временные диаграммы, полученные посредством линейной ММ на основе уравнений Кирхгофа с расчетом магнитных проводимостей воздушных зазоров по методу Ротерса, учитывая при этом геометрию магнитной системы генератора, потоки рассеяния и выпучивания магнитной системы, посредством соответствующих коэффициентов рассчитанных МКЭ. Под номером *3* преведены временные диаграммы, полученные посредством нелинейной ММ на основе уравнений Кирхгофа и Максвелла (18).

Приняв за истинные значения результаты, полученные посредством нелинейной ММ на основе уравнений Кирхгофа и Максвелла (18), относительная погрешность расчетов активной мощности ГКК по линейной ММ без уточняющих коэффициентов и линейной ММ, учитывающей геометрию, потоки рассеяния и выпучивания магнитной системы генератора, представлена на рис. 7.



а)



б)

Рис. 7. Относительная погрешность расчетов активной мощности генератора: *а* – по линейной ММ без уточняющих коэффициентов; *б* – по линейной ММ с уточняющими коэффициентами

Из рис. 7, *а* видно, что, учитывая в линейной ММ на основе уравнений Кирхгофа геометрию, магнитные потоки рассеяния и выпучивания магнитной системы генератора, посредством соответствующих коэффициентов рассеяния и выпучивания, точность полученных результатов возрастает не менее чем на 15 % по сравнению с традиционными [15] линейными ММ на основе уравнений Кирхгофа, в которых расчет магнитных проводимостей воздушных зазоров осуществляется по методу Ротерса. Кроме того, из рис. 7, *б* видно, что расхождение результатов, полученных по нелинейной и линейной ММ, учитывающей геометрию, потоки рассеяния и выпучивания магнитной системы генератора, не превышает 5 %, что является приемлемой для большинства инженерных расчетов точностью. Основным недостатком нелинейной ММ является сложность ее применения для решения задач оптимизации и управления, поэтому ее целесообразно использовать на завершающих этапах проектирования с целью уточнения полученных результатов.

Заключение

Таким образом, разработанная ММ ГКК на основе уравнений Кирхгофа и Максвелла позволяет получить мгновенные значения мощности, напряжения и тока на выходе комбинированного генератора, учитывая при этом продольное и поперечное изменение магнитного потока, нелинейность кривой намагничивания ферромагнитных материалов, насыщение участков магнитопровода, различие магнитных свойств сред и неравномерности распределения магнитного потока в воздушном зазоре, что позволяет повысить степень адекватности математической модели не менее чем на 15 % по сравнению с традиционными ММ на основе уравнений Кирхгофа.

Литература

1. Военно-патриотический сайт «Отвага» Российской Федерации. – Режим доступа: www.otvaga2004.ru/na-zemle/na-zemle-11/modern_land_robots_1/. – Дата доступа: 28.10.2017.
2. Пинский, Ф. И. Энергоустановки со свободнопоршневыми двигатель-генераторами / Ф. И. Пинский // Бортовая энергетика. – 2004. – № 2. – С. 13–17.
3. Cawthorne, W. R. Optimization of a Brushless Permanent Magnet Linear Alternator for Use with a Linear Internal Combustion Engine: Diss. College Eng. and Mineral Resources / W. R. Cawthorne. Morgantown, 1999. – 113 p.
4. Темнов, Э. С. Разработка теоретических основ расчета и конструирования малоразмерных двигатель-генераторных установок как единой динамической системы : дис. … канд. техн. наук : 05.04.02 / Э. С. Темнов. – Тула, 2005. – 134 л.

5. Hanipah, M. R. Recent commercial free-piston engine developments for automotive applications. Applied Thermal Engineering / M. R. Hanipah, R. Mikalsen, A. P. Roskilly. – 2015. – P. 493–503.
6. Применение возвратно-поступательного генератора комбинированной конструкции для повышения КПД и уменьшения удельной массы энергоустановок автономных образцов вооружения / А. Б. Менжинский [и др.] // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2017. – № 4 (57). – С. 62–72.
7. Применение активного выпрямителя с возвратно-поступа-тельными генераторами комбинированной конструкции для повышения эффективности энергоустановок автономных объектов / А. Б. Менжинский [и др.] // Магист. Вестн. Нац. акад. наук Респ. Беларусь. – 2017. – С. 40–50.
8. Использование возвратно-поступательной схемы электрического генератора для повышения эффективности энергоустановок автономных образцов вооружения / А. Б. Менжинский [и др.] // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2016. – № 4 (53). – С. 108–114.
9. Копылов, И. П. Математическое моделирование электрических машин / И. П. Копылов. – М. : Высш. шк., 2001. – 327 с.
10. Буль, О. Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов: Магнитные цепи, поля и программа FEMM : учеб. пособие для студентов высш. учеб. заведений / О. Б. Буль. – М. : Академия, 2005. – 336 с.
11. Ледовский, А. Н. Электрические машины с высококоэрцитивными постоянными магнитами / А. Н. Ледовский. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 169 с.
12. Кулон, Ж.-Л. САПР в электротехнике ; пер. с фр. / Ж.-Л. Кулон, Ж.-К. Сабоннадьер. – М. : Мир, 1988. – 203 с. : ил.
13. Сочава, М. В. Решение полевых задач с помощью программы ELCUT 6.0. Задачи магнитостатики и магнитного поля переменных токов : учеб. пособие / М. В. Сочава. – СПб., 2014. – 38 с.
14. Нейман, Л. А. Решение задачи учета нелинейных свойств динамической модели электромагнитного привода / Л. А. Нейман, А. С. Шабанов, В. Ю. Нейман // Материалы XIX Международной научно-практической конференции, Москва, 7–8 окт. 2015 г. – М., 2015. – С. 58–62.
15. Иванов-Смоленский, А. В. Электрические машины : учеб. для вузов / А. В. Иванов-Смоленский. – М. : Энергия, 1980. – 928 с.

Получено 19.03.2018 г.