

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПРИВОДА ВАКУУМНОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ

Васильева О.В.¹

¹ФГБОУ ВПО «НИ ТПУ» («Национальный исследовательский Томский политехнический университет»), Томск, Россия (634050, г. Томск, пр. Ленина, 30), e-mail: vasileva.o.v@mail.ru

В статье описывается метод сведения физических процессов, происходящих в электромагнитном приводе вакуумного выключателя, к представленной электротехнической схеме замещения, рассматривается задача расчета магнитного поля системы сложной конфигурации с последующим расчетом индуктивности. Дискретные значения индуктивности с помощью сплайновой аппроксимации преобразовывались в непрерывные. Расчет индуктивности осуществлялся через энергию магнитостатического поля в разные интервалы времени. Получено решение системы дифференциальных уравнений равновесия напряжения и тока в цепи, установлена ее связь с механическими процессами в системе. Дано представление об относительных вкладах различных видов энергий в формирование процесса и влиянии различных типов диссипации энергии, процессов переноса и трансформаций одного вида энергии в другой. В качестве правильности работы алгоритма проведен расчет баланса энергии рассматриваемой системы.

Ключевые слова: моделирование, электромагнитный привод, электротехническая схема замещения, математическая модель, энергия магнитного поля, переменная индуктивность, уравнение Лагранжа, метод Рунге-Кутты, баланс энергии.

MODELLING OF THE ELECTROMAGNETIC DRIVE OF THE VACUUM SWITCH

Vasileva O.V.¹

¹National research Tomsk polytechnic university, Tomsk, Russia (634050, Tomsk, Lenin prospect, 30), e-mail: vasileva.o.v@mail.ru

In article the method of data of the physical processes happening in the electromagnetic drive of the vacuum switch, to the presented electrotechnical equivalent circuit is described, the problem of calculation of a magnetic field of system of a difficult configuration with the subsequent calculation of inductance is considered. Discrete values of inductance by means of spline approximation were transformed to the continuous. Calculation of inductance was carried out through energy of a magnetostatic field in different intervals of time. The decision of system of the differential equations of balance of tension and current in a chain is received, its connection with mechanical processes in system is established. Idea of relative deposits of different types of energy in formation of process and influence of various types of dissipation of energy, processes of transfer and transformations of one type of energy in another is given. As correctness of work of algorithm calculation of balance of energy of considered system is carried out.

Key words: modeling, electromagnetic drive, electrotechnical equivalent circuit, mathematical model, energy of a magnetic field, variable inductance, equation of Lagrange, method Runge-Kutta, balance of energy.

Введение

Для обеспечения надежности всей энергетической системы используются вакуумные выключатели. Для включения вакуумных выключателей целесообразно применять электромагнитные приводы от емкостных накопителей, например конденсаторов, способных потреблять электроэнергию с меньшими мощностями, которые имеют ряд преимуществ: имеют наименьшее количество деталей, повышая уровень надежности, просты в изготовлении, имея одну подвижную деталь – якорь, наименее габаритные [1; 4].

Математическое описание процесса включения выключателя с электромагнитным приводом от емкостного накопителя представляет значительные трудности, т.к. задача

получается многофакторной в силу нелинейности следующих элементов: нелинейности кривой намагничивания материала магнитопровода электромагнита и изменения его индуктивности в процессе включения, сопротивления пружин поджатия и отключения. В связи с этим становится актуальным теоретическое изучение физических процессов, происходящих в электромагнитном приводе вакуумного выключателя (ЭПВВ).

Цель исследования

Целью исследования является построение и исследование математической модели ЭПВВ, расчет магнитного поля системы сложной конфигурации с последующим расчетом динамики изменения переменной индуктивности. Исследование осуществляется на примере модельного вакуумного выключателя типа ВБСК-10-20/1000, соответствующего реально используемому на практике устройству [5].

Вывод основных соотношений

На рисунке 1 представлена упрощенная модель электромагнитного привода вакуумного выключателя. Для описания процессов, происходящих в электромагнитном приводе, представим его как электромеханическое устройство [3].

На том же рисунке приводится электротехническая схема замещения, в которой C – емкость батареи конденсаторов, $L(z(t))$ – переменная индуктивность электромагнитного привода, R – сопротивление, L_0 – начальная индуктивность катушки.

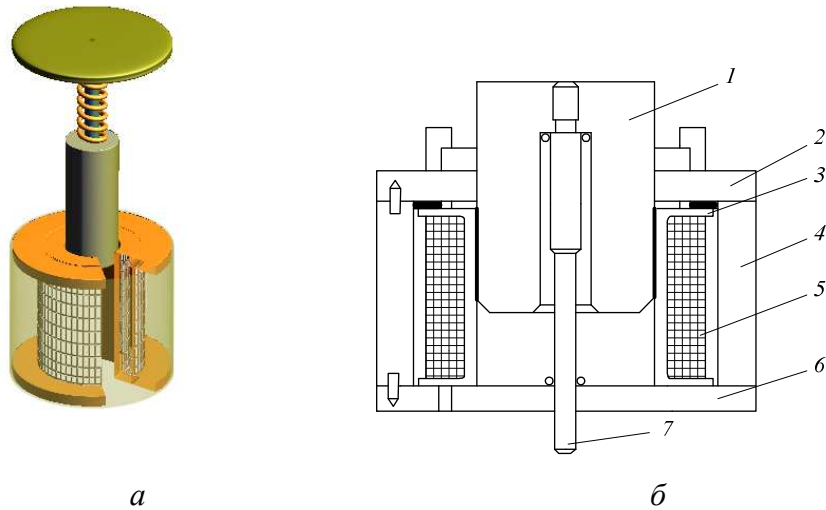
Для математического описания рассматриваемого устройства необходимо иметь величины параметров $L_0, R, L(t), C$ электромеханической модели. Приведем их описание.

В электротехнической схеме батарея конденсаторов емкостью $C = 7700 \cdot 10^{-4} \text{ Ф}$ заряжается до напряжения $U_0 = 300 \text{ В}$. Энергия электростатического поля, запасенная в конденсаторе, передается в электрическую цепь. Сопротивление цепи будем считать равным $R = 9 \text{ Ом}$. Далее необходимо рассчитать два следующих параметра: L_0 и $L(t)$.

Катушка имеет сложную конфигурацию электродов, поэтому расчет индуктивности катушки в работе проведен через известное энергетическое соотношение, в соответствии с которым:

$$W_1 = \frac{I^2 L_0}{2} \rightarrow L_0 = \frac{2W_1}{I^2}, \quad (1)$$

здесь I – ток в цепи, W_1 – энергия магнитного поля, L_0 – индуктивность.



1) якорь (сталь); 2) плита верхняя (сталь); 3) каркас катушки (дерево); 4) плита боковая; 5) токовая обмотка из меди; 6) плита нижняя; 7) вал (дерево)

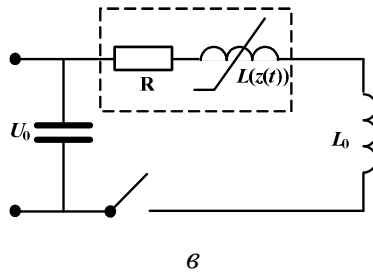


Рис. 1. Упрощенная модель электромагнитного привода вакуумного выключателя: а) сечение электромагнитного привода; б) модель электромагнитного привода; в) электротехническая схема замещения привода

В свою очередь энергию магнитного поля при заданной конфигурации электродов и заданном распределении токов можно определить, используя последовательность соотношений [6]:

$$W_1 = \frac{1}{2} \int_V \mathbf{A} \delta dV \rightarrow L_0 = \frac{2W_1}{I^2} = \frac{1}{I^2} \int_V \mathbf{A} \delta dV, \quad (2)$$

где \mathbf{A} – векторный магнитный потенциал, δ – вектор плотности тока.

Апробация метода была произведена на примере цилиндрической катушки с многослойной обмоткой прямоугольного сечения [2].

Используя (2) и рис. 1б была получена расчетная формула (3) для расчета индуктивности катушки на основе расчета электромагнитного поля [2]:

$$L = \frac{2\pi \cdot 10^9}{S^2} \cdot \int_{r_1}^{r_1+h} \rho' \cdot \left(\int_{z_1}^{z_1+d} \mathbf{A}(\rho', z') dz' \right) d\rho', \quad (3)$$

где S - площадь сечения; r_1 - внутренний радиус; h - высота обмотки; d - ширина обмотки; z_1 - нижний предел интегрирования по оси z ; $\mathbf{A}(\rho', z')$ - функция распределения векторного потенциала, пространственный вид которого представлен на рис. 3; ρ' - радиус элементарной кольцевой трубки тока; z' - переменная интегрирования вдоль оси z ; $d\rho' dz'$ - сечение элементарной кольцевой трубки тока.

Расчет поля векторного потенциала проведен на основе метода конечных элементов в программе MATLAB в декартовой системе координат и, используя сплайновую технологию, преобразован в цилиндрическую систему координат. Результаты расчетов приведены ниже (рис. 3).

Алгоритм для расчета динамической индуктивности ЭПВВ в программно-интегрированных средах MATLAB и MathCAD

1. Ввод данных: геометрические размеры установки, плотность тока, магнитная проницаемость, граничные условия.
2. Построение геометрической конфигурации установки и граничные условия области.
3. Учет неоднородного распределения псевдомагнитной проницаемости.
4. Триангуляция области со сложной геометрией электродов в плоскости.
5. Расчет поля распределения потока магнитной индукции.
6. Преобразование триангулированной сетки в прямоугольную сетку.
7. Пересчет полученных величин из декартовой системы в цилиндрическую систему.
8. Расчет поля распределения векторного магнитного потенциала.
9. Сохранение данных в текстовом документе в кодах ASCII.
10. Перевод данных в среду MathCAD.
11. Преобразование дискретных значений поля в непрерывные с помощью сплайновой аппроксимации.
12. Аprobация алгоритма с помощью справочных данных $L - L_{\text{инд}} \leq 2\%$.
13. Выход: расчет динамики изменения индуктивности катушки.

Новизна алгоритма заключается в пересчете результатов решения из декартовой системы координат в цилиндрическую систему на основе введения неоднородного распределения псевдомагнитной проницаемости.

На рис. 2 показан интерфейс программы, позволяющей рассчитывать индуктивности коаксиальных устройств, в том числе и переменную индуктивность катушки электромагнитного привода вакуумного выключателя (ЭПВВ) (левое окно), где:

$y1$ – начальное положение нижней границы якоря (ЭПВВ);

$y2$ – конечное положение нижней границы якоря (ЭПВВ);

h – шаг;

m - магнитная проницаемость;

j - плотность тока.

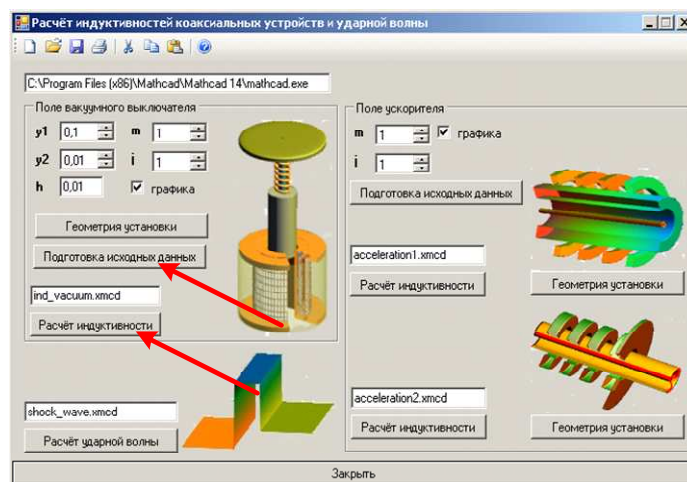


Рис. 2. Интерфейс программы для расчета индуктивностей коаксиальных устройств

Методика исследования

На рисунке 3 представлено распределение векторного потенциала в зависимости от положения якоря и соответствующее значение индуктивности.

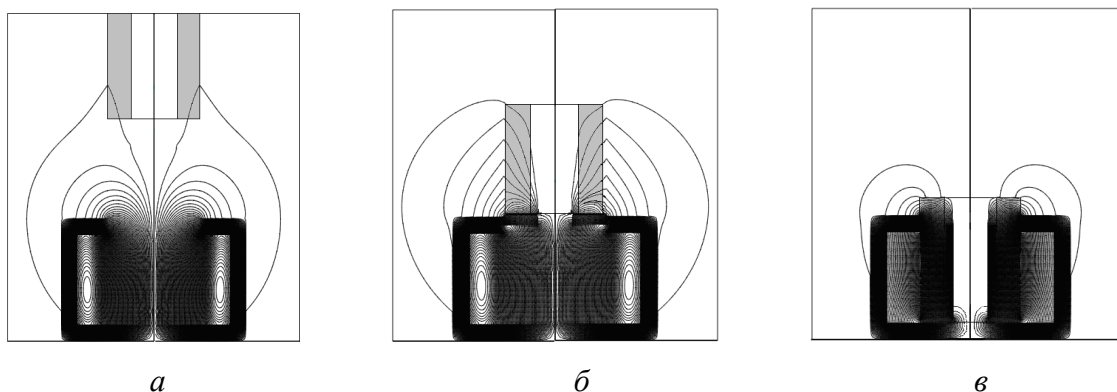


Рис. 3. Распределение векторного потенциала поля при различном положении якоря и соответствующее значение индуктивности катушки: а) $L = 1,1 \cdot 10^{-7} \tilde{A}i$; б) $L = 1,39 \cdot 10^{-7} \tilde{A}i$; в) $L = 19,11 \cdot 10^{-7} \tilde{A}i$

Начальная индуктивность катушки, рассчитанная по разработанному алгоритму, равна $L = 1,1 \cdot 10^{-7} \tilde{A}i$. При движении якоря в сторону стопа индуктивность сначала плавно увеличивается, затем резко возрастает почти в 20 раз.

Динамику изменения расположения якоря по отношению к катушке можно проследить на рисунке 4:

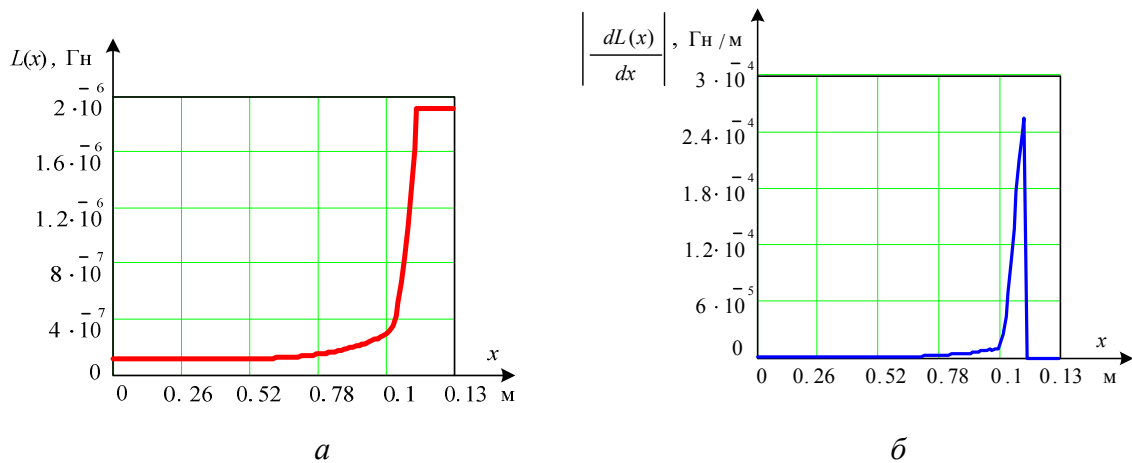


Рис. 4. Динамика изменения расположения якоря по отношению к катушке: а) зависимость индуктивности $L(x)$ от положения якоря x ; б) зависимость производной индуктивности $\left| \frac{dL(x)}{dx} \right|$

Таким образом, в DLL MATLAB было получено распределение векторного потенциала поля исследуемой модели. Дискретные значения индуктивности с помощью кубической сплайновой аппроксимации преобразовывались в непрерывные. Получена начальная индуктивность катушки, используя уравнение (3) и зная геометрические параметры катушки: $L_0 = 1,1 \cdot 10^{-7} \tilde{A}i$.

Математическая модель ЭПВВ

На основе уравнения Лагранжа с использованием второго закона Кирхгофа и второго закона Ньютона получена система нелинейных дифференциальных уравнений (4), которая решена численно, для повышения точности расчета она предварительно была сведена к системе дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\begin{cases} \frac{dz}{dt} = v \\ \frac{dv}{dt} = \frac{1}{m} \frac{i^2}{2} \frac{\partial}{\partial z} L(z) \\ \frac{d}{dt} i = \frac{-i \frac{\partial L(z)}{\partial z} + U_c - iR + U_0}{L(z)} \\ \frac{d}{dt} U_c = -\frac{i}{C} \end{cases} \quad \text{в векторной форме} \rightarrow \frac{d\mathbf{X}}{dt} = D(t, \mathbf{X}), \quad (4)$$

здесь $\mathbf{X} = [x_1 = z(t), x_2 = v(t), x_3 = i(t), x_4 = u_c(t)]^T$ – вектор состояния содержит следующие компоненты: $z(t)$ – координату, $v(t)$ – скорость, $I(t)$ – ток и $u_c(t)$ – напряжение на

конденсаторе; $D(t, \mathbf{X})$ – расширенная матрица. После расчета основных величин $\mathbf{X}(t)$ полезно рассчитать вспомогательные величины: кинетическую энергию движения якоря $W_{\text{кин}}(t)$, магнитную энергию индуктивности $W_L(t)$, электрическую энергию конденсатора $W_C(t)$, омическую энергию потерь $W_R(t)$ (рис. 5).

В качестве правильности работы алгоритма расчета была проведена проверка баланса энергии (5) рассматриваемой системы (рис. 5):

$$\frac{U_0^2 C}{2} = \frac{mv^2(t)}{2} + \int_0^t i^2(t) R(t) dt + \frac{u_C^2(t) C}{2} + \frac{i^2(t) L(z(t))}{2}. \quad (5)$$

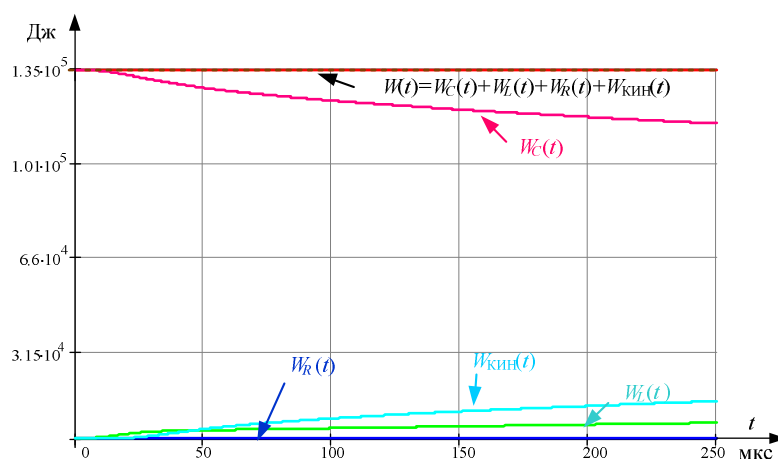
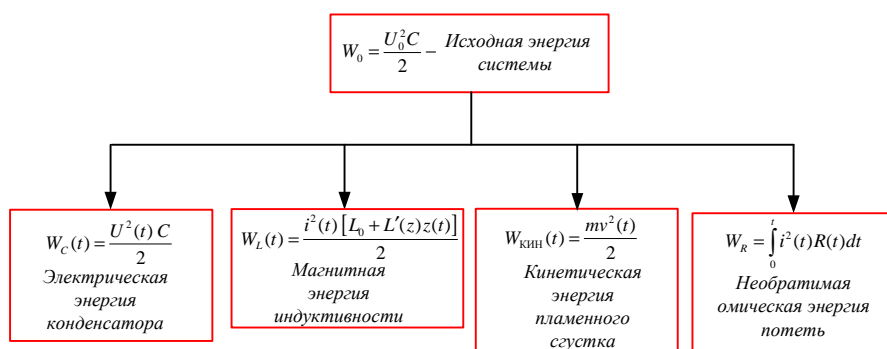


Рис. 5. Схема распределения энергии в плазменном ускорителе

Заключение

В работе предложена математическая модель для исследования процессов, происходящих в ЭПВВ, и алгоритм расчета электрических и кинематических параметров на основе использования представленной электротехнической схемы замещения (рис. 1в).

Представлен алгоритм расчета переменной индуктивности катушки, имеющей сложную конфигурацию, на основе расчета энергии электромагнитного поля, в зависимости от положения якоря, получена зависимость производной индуктивности (рис. 4б).

Получено решение системы дифференциальных уравнений равновесия напряжения и тока в цепи, установлена ее связь с механическими процессами в системе.

В качестве правильности работы алгоритма расчета проведен расчет баланса энергии рассматриваемой системы.

Список литературы

1. Василенко В.Н., Лавринович В.А. Включение вакуумного выключателя типа ВБСК-10-20/1000 от емкостного накопителя энергии // Известия вузов. Электромеханика. – Томск, 2006. – № 6. – С. 38–40.
2. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей : справочная книга. - 3-е изд., перераб. и доп. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. – 488 с.
3. Качесов В.Е. Эскалация перенапряжений, виртуальный срез тока в вакуумных выключателях при отключении электродвигателей и их предотвращение с помощью RC-цепочек // Электричество. - 2008. - № 6. – С. 24–33.
4. Кукарцев А.Ю., Лавринович В.А. Опыт эксплуатации электрооборудования собственных нужд напряжением 6 кВ Беловской ГРЭС // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. - 2008. - Спец. выпуск № 1. – С. 40–44.
5. Кукарцев А.Ю., Лавринович В.А. Проблемы эксплуатации высоковольтных электродвигателей // Проблемы энергетики. - Казань, 2010. - № 3-4/1. - С. 147–153.
6. Яцкевич В.В. Теория линейных электрических цепей. – Минск : Выш. шк., 1990. – 264 с.

Рецензенты:

Сивков А.А., д.т.н., профессор кафедры ЭПП ЭНИН ФГБОУ ВПО «НИ ТПУ», Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск.

Новиков С.А., д.ф.-м.н., профессор кафедры ЭСиЭ ЭНИН ФГБОУ ВПО «НИ ТПУ», Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск.