

УРАВНЕНИЯ ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТА ПОСТОЯННОГО ТОКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕГО ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Татевосян А.С.¹, Пимонова У.В.¹, Поляков Д.А.¹, Шелковников С.В.¹, Шелковникова Ю.В.²

¹ФГБОУ ВПО «Омский государственный технический университет», Омск, e-mail: ast_51@mail.ru

²ФГБОУ ВПО «Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург, e-mail: shelk_07@list.ru

В статье рассматриваются уравнения динамики электромагнита постоянного тока. Для определения временных зависимостей тока, перемещения, скорости якоря, потокосцепления обмотки, тягового усилия уравнения динамики электромагнита постоянного тока объединяются в систему для совместного решения. Решение задачи динамики электромагнита постоянного тока сводится к рассмотрению следующих вопросов: построение математической модели динамики электромагнита постоянного тока; получение математических выражений для тягового усилия и потокосцепления обмотки; построение численных моделей магнитного поля при различных положениях якоря в комплексе программ Elcut. Расчет зависимости инверсной индуктивности обмотки от хода якоря производится при допущении о плоскопараллельном характере магнитного поля электромагнита. Расчет динамических характеристик электромагнита рассмотрен на примере схемы непосредственного включения обмотки контактора на постоянное напряжение источника питания, а также схемы ускорения времени его срабатывания с помощью конденсатора и добавочного сопротивления. Приводится анализ и сопоставление полученных расчетных данных.

Ключевые слова: электромагнит постоянного тока, динамические характеристики, тяговое усилие, ток, потокосцепление обмотки, перемещение, скорость, якорь.

DYNAMICS EQUATIONS OF THE DC ELECTROMAGNET AND THE STUDY OF ITS DYNAMIC CHARACTERISTICS

Tatevosyan A.S.¹, Pimonova U.V.¹, Polyakov D.A.¹, Shelkovnikov S.V.¹, Shelkovnikova J.V.²

¹Omsk State Technical University Omsk, e-mail: ast_51@mail.ru

²St. Petersburg National University of the mineral resource «Gornyy», St. Petersburg, e-mail: shelk_07@list.ru

In the paper the equations of dynamics of an electromagnet of a direct current are considered. For determination of temporary dependences of current, movement, speed of an anchor, flux linkage of a winding, traction effort of the equation of dynamics of an electromagnet of a direct current unite in system for the joint decision. The solution of a problem of dynamics of an electromagnet of a direct current is consolidated to consideration of the following questions: creation of mathematical model of dynamics of an electromagnet of a direct current; receiving mathematical expressions for traction effort and flux linkage of a winding; creation of numerical models of a magnetic field at various provisions of an anchor in a complex of the Elcut programs. Calculation of dependence of inverse inductance of a winding on the course of an anchor is made at an assumption about plane-parallel character of a magnetic field of an electromagnet. Calculation of dynamic characteristics of an electromagnet is considered on the example of the scheme of direct inclusion of a winding of the contactor on the constant tension of the power supply, and also the scheme of acceleration of time of its operation by means of the condenser and additional resistance. The analysis and comparison of the obtained settlement data is provided.

Keywords: electromagnet of a direct current, dynamic characteristics, traction effort, current, flux linkage of a winding, movement, speed, anchor.

Электромагниты (ЭМ) представляют собой обширный класс устройств автоматики, осуществляющих преобразование электрической энергии источника питания в механическую энергию (движения, удара, нажатия, удержания) якоря. Простота конструкции ЭМ, их высокая надежность в работе, возможность получения разнообразных динамических характеристик, от согласования которых с параметрами исполнительного механизма зависит

работоспособность устройства в целом, predeterminedили широкое их применение на практике. Наиболее распространенные типы ЭМ включают в себя электрические контактные аппараты управления, защиты и автоматики (контакторы, магнитные пускатели, электромагнитные реле и пр.). Основными характеристиками ЭМ, подлежащему определению, являются зависимости от времени:

- электромагнитной силы (тягового усилия) $F_{\text{Э}}(t)$;
- тока $i(t)$;
- потокосцепления обмотки $\psi(t)$;
- перемещения $x(t)$;
- скорости якоря $v(t)$.

Эти зависимости обычно определяются при срабатывании ЭМ при его включении или отключении с использованием методов физического макетирования и математического моделирования.

Рассмотрим условную схему некоторого ЭМ постоянного тока (рис. 1). Пусть якорь электромагнита массой $m_{\text{я}}$ под действием электромагнитной силы перемещается в пределах хода якоря $0 \leq x \leq \delta_{\text{н}} - \delta_{\text{к}}$, где $\delta_{\text{н}}$ – начальный рабочий зазор, $\delta_{\text{к}}$ – конечный рабочий зазор. Направление отсчета перемещения якоря выберем в сторону уменьшения рабочего зазора δ , тогда перемещение якоря будет $x = \delta_{\text{н}} - \delta$. Направление отсчета перемещения якоря выберем в сторону уменьшения рабочего зазора δ , тогда перемещение якоря будет $x = \delta_{\text{н}} - \delta$.

В схеме приняты следующие условные обозначения S – ключ, R – омическое сопротивление обмотки, $\delta(t)$ – текущий (изменяющийся во времени) рабочий воздушный зазор, $x(t)$ – ход якоря, $m_{\text{я}}$ – масса якоря; Φ – магнитный поток; w – число витков.

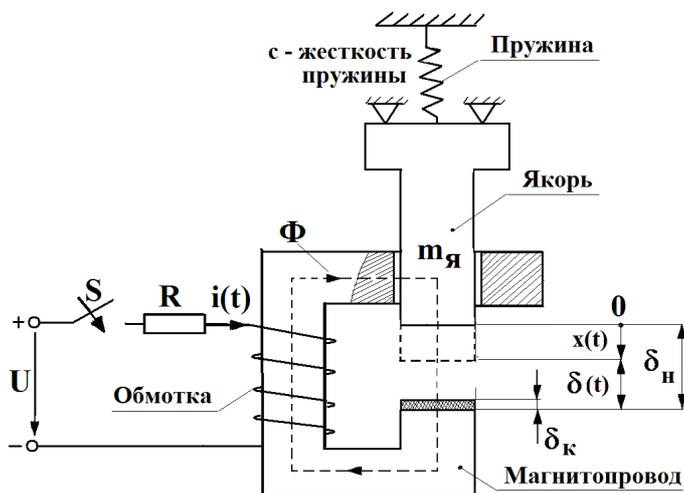


Рис. 1. Условная схема ЭМ при включении на постоянное напряжение

Замкнем ключ S (рис. 1) и подадим на обмотку ЭМ постоянное напряжение источника питания. В электрической цепи обмотки, расположенной на стальном сердечнике, возникнет переходный процесс, который описывается дифференциальным уравнением электрического равновесия (1) и алгебраическим уравнением состояния магнитной цепи (2), входящих в систему для совместного решения:

$$\begin{cases} U=i(t) \cdot R + \frac{d\psi}{dt}; & (1) \\ \psi=\psi(i, x) & (2) \end{cases}$$

Уравнение (2) в системе уравнений представляет собой в общем случае нелинейные характеристики $\psi = \psi(i)$, зависящие от рабочего зазора δ , а значит, от координаты x , определяющей перемещение якоря [1]. Графически эти характеристики изображаются семейством кривых $\psi = \psi(i, x)$, построенных для различных значений переменной x в области определения $0 \leq x \leq \delta_n - \delta_k$, причём при больших рабочих зазорах в начале хода якоря зависимость $\psi(i)$ сравнительно пологая, а при малых зазорах в конце хода якоря – более крутая (рис. 2 а). При отсутствии насыщения стального сердечника зависимость $\psi = \psi(i, x)$ представляет собой семейство прямых линий (рис. 2 б), проходящих через начало координат с различным наклоном к оси абсцисс (токов).

При переходном процессе ток в обмотке не является постоянным, а изменяется по сложному закону, о чём можно судить по перемещению рабочей точки A состояния магнитной цепи ЭМ на обоих графиках (рис. 2 а, б) в направлении, указанном стрелками, очерчивая путь

$$0 \rightarrow A_{тр} \rightarrow A(t) \rightarrow A_{ср} \rightarrow A_y. \quad (3)$$

где 0 – точка отсчета времени переходного процесса в момент замыкания ключа S ;

$A_{тр}$ – точка, при которой ток достигает значения тока трогания за промежуток времени (время трогания $t_{тр}$) с момента подачи напряжения на обмотку до момента начала движения якоря;

$A(t)$ – точка, соответствующая текущим изменяющимся во времени значениям тока и потокосцепления обмотки при движении якоря; $A_{ср}$ – точка, определяющая значения тока и потокосцепления обмотки спустя промежуток времени с момента подачи напряжения на обмотку до момента остановки якоря, называемый временем срабатывания $t_{ср} = t_{дв} + t_{тр}$;

A_y – точка, характеризующая окончание переходного процесса, и определяющая установившиеся значения тока и потокосцепления обмотки.

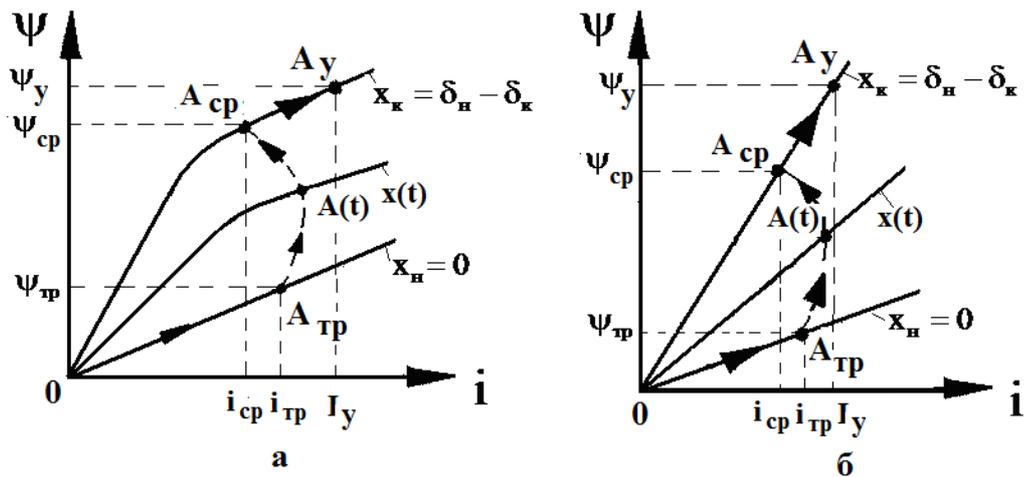


Рис. 2. Зависимость $\Psi = \Psi(i, x)$ при различных значениях перемещения в пределах хода якоря $0 \leq x \leq \delta_n - \delta_k$:
 а) магнитная система насыщена; б) магнитная система не насыщена

Из уравнения электрического равновесия (1), справедливого для каждого положения якоря в интервале $0 \leq x \leq \delta_n - \delta_k$, нетрудно получить уравнение баланса энергии, учитывающего особенности преобразования электромагнитной энергии в разных частях ЭМ при движении якоря. С этой целью умножим обе части уравнения (1) на произведение $i \cdot dt$, тогда получим:

$$U \cdot idt = R \cdot i^2 dt + id\psi, \quad (4)$$

где $U \cdot idt$ – электрическая энергия источника питания; $R \cdot i^2 dt$ – энергия, расходуемая на нагрев обмоточного провода и рассеиваемая в окружающую среду; $id\psi$ – энергия, передаваемая в магнитную систему ЭМ магнитным полем.

Очевидно, что последнее слагаемое в правой части уравнения (4) определяет суммарную энергию, затрачиваемую на движение якоря и изменение энергии магнитного поля, поэтому можно записать

$$id\psi = F_{\text{ЭМ}} dx + dW_M, \quad (5)$$

где $F_{\text{ЭМ}}$ – электромагнитная сила, действующая на якорь; dW_M – изменение энергии магнитного поля; $F_{\text{ЭМ}} dx$ – механическая работа по перемещению якоря.

С учетом равенства энергий (5) уравнение баланса энергии (4) принимает вид:

$$U \cdot idt = R \cdot i^2 dt + F_{\text{ЭМ}} dx + dW_M. \quad (6)$$

Равенство энергий (5) можно рассматривать как уравнение для определения электромагнитной силы $F_{\text{ЭМ}}$. В общем случае, когда ток $i \neq \text{const}$ и потокосцепление катушки $\psi \neq \text{const}$, электромагнитную силу следует определять по выражению

$$F_{\text{ЭМ}}dx = \frac{1}{2} \left(i \cdot \frac{\partial \psi}{\partial x} dx + \frac{\partial \psi}{\partial i} idi - \psi di \right). \quad (7)$$

В частности, если магнитная система ЭМ насыщена, то

$$\text{при } i = \text{const} \quad F_{\text{ЭМ}} = \frac{1}{2} i \cdot \frac{d\psi}{dx} = \frac{dW_{\text{М}}}{dx}; \quad (8)$$

$$\text{при } \psi = \text{const} \quad F_{\text{ЭМ}} = -\frac{1}{2} \cdot \psi \frac{di}{dx} = -\frac{dW_{\text{М}}}{dx}. \quad (9)$$

Для ненасыщенной магнитной системы ЭМ можно записать:

$$\psi(i, x) = L(x) \cdot i, \quad (10)$$

где $L(x)$ – индуктивность обмотки ЭМ, определяющая угол наклона прямых $\psi(i)$ при различных значениях перемещений якоря x .

Найдем частные производные, используя выражение (10)

$$\frac{\partial \psi}{\partial x} = \frac{d\psi}{dx} = i \frac{dL(x)}{dx}; \quad (11)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial i} = \frac{d\psi}{di} = L(x). \quad (12)$$

Выполним подстановку (11) и (12) в выражение электромагнитной силы (7), тогда получим

$$F_{\text{ЭМ}}dx = \frac{1}{2} \left[i^2 \frac{dL(x)}{dx} dx + L(x) idi - L(x) idi \right]. \quad (13)$$

Два слагаемых, помещенные в скобки, в этом выражении компенсируют друг друга, поэтому в окончательном виде формула электромагнитной силы для ненасыщенной магнитной системы контактора имеет вид:

$$F_{\text{ЭМ}} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(x)}{dx}. \quad (14)$$

Данное выражение электромагнитной силы широко используется в практике проектирования ЭМ различного назначения.

Инверсную индуктивность (величина обратная индуктивности) обмотки ЭМ представим уравнением прямой линии

$$\Gamma(x) = L^{-1}(x) = a - bx, \quad (15)$$

где $a = \frac{1}{L_{\text{н}}}$, $b = \frac{1}{L_{\text{н}} \delta_{\text{н}}}$ – коэффициенты полинома первого порядка.

Очевидно, что зависимость инверсной индуктивности обмотки от перемещения якоря $\Gamma(x)$ при отсутствии насыщения магнитной цепи ЭМ и учете выпучивания магнитного потока в рабочем зазоре δ будет мало отличаться от прямой линии на большей части хода якоря, однако коэффициенты аппроксимирующего полинома будут существенно другими.

Для определения коэффициентов (a, b) можно применить следующую схему расчета:

- численным методом с помощью комплекса программ Elcut рассчитать магнитное поле ЭМ с учетом истинной геометрии его магнитной системы, характеристик используемых магнитных материалов и заданных граничных условий при выбранном рабочем токе i_p и фиксированных значениях перемещений якоря, задаваемых в диапазоне $0 \leq x \leq \delta_H - \delta_K$;

- по результатам расчета магнитного поля при фиксированном рабочем зазоре вычислить через потокосцепление или запас энергии магнитного поля индуктивность (инверсную индуктивность) обмотки ЭМ;

- построить график зависимости $\Gamma(x)$ при выбранном рабочем токе i_p и аппроксимировать его прямой линией, вычислив коэффициенты аппроксимирующего полинома.

Зависимость инверсной индуктивности $\Gamma(x)$ обмотки от перемещения якоря может быть использована для расчета электромагнитной силы с учетом выпучивания магнитного потока в рабочем зазоре, характеристик используемых магнитных материалов и истинной геометрии магнитной системы ЭМ

$$F_{ЭМ} = \frac{1}{2} i_p^2 \frac{dL(x)}{dx} = \frac{1}{2} i_p^2 \frac{b}{(a - bx)^2}. \quad (16)$$

Для предупреждения ошибки расчета электромагнитной силы при малых значениях рабочего зазора по формуле (16), особенно в конце хода якоря $x = \delta_H - \delta_K$, используют формулу Максвелла. Если магнитное поле в рабочем зазоре равномерно и полюсы ненасыщенны, то формула Максвелла для силы в одном зазоре имеет вид:

$$F_{ЭМ} = \frac{B^2 S}{2\mu_0}. \quad (17)$$

Пренебрегая силой трения, уравнение движения якоря имеет вид:

$$m_{я} \frac{dv}{dt} = F_{ЭМ} + P_{я} - F_{ПР}, \quad (18)$$

где $F_{ПР} = F_0 + c \cdot x$ – сила сжатия (растяжения) возвратной пружины; F_0 – сила начального сжатия (растяжения) возвратной пружины; c – жесткость пружины; v – скорость якоря; $P_{я} = m_{я} \cdot g$ – вес якоря; $m_{я}$ – масса подвижных частей, приведенных к якорю; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения.

Полная система уравнений, характеризующая изменение тока и движение якоря при переходном процессе, возникающем с момента подачи на обмотку ЭМ постоянного напряжения источника питания, имеет следующий вид:

$$\begin{cases} U = R \cdot i + \frac{1}{(a - bx)} \frac{di}{dt} + \frac{b}{(a - bx)^2} \cdot i \cdot v, \\ m_{\text{я}} \frac{dv}{dt} = \frac{1}{2} i^2 \frac{b}{(a - bx)^2} - (F_0 + cx) + m_{\text{я}} \cdot g, \\ \frac{dx}{dt} = v, \end{cases} \quad (19)$$

где в первом уравнении системы слагаемое $\frac{1}{(a - bx)} \frac{di}{dt} + \frac{b}{(a - bx)^2} \cdot i \cdot v = \frac{d\psi}{dt}$.

Для решения полученной системы уравнений необходимо задаться начальными условиями:

а) до начала движения якоря требуется определить $i(t)$, $F_{\text{ЭМ}}(t)$, $t_{\text{ТР}}$, $i_{\text{ТР}}$ при следующих начальных условиях (в момент времени $t = 0$)

$$x = 0, \quad i = 0, \quad v = 0, \quad \frac{dv}{dt} = 0. \quad (20)$$

б) в процессе движения якоря, когда $0 \leq x \leq x_{\text{К}} = \delta_{\text{Н}} - \delta_{\text{К}}$ и время $t_{\text{ТР}} \leq t \leq t_{\text{СР}}$, требуется определить

$$i(t); \quad x(t); \quad v(t); \quad \frac{dv(t)}{dt}; \quad F_{\text{ЭМ}}(t); \quad \psi(t); \quad i(t_{\text{СР}}); \quad t_{\text{СР}}; \quad t_{\text{ДВ}} = t_{\text{СР}} - t_{\text{ТР}}$$

при начальных условиях в момент времени $t = t_{\text{ТР}}$

$$x = 0, \quad i = i_{\text{ТР}}, \quad v = 0, \quad \frac{dv}{dt} = 0. \quad (21)$$

в) при остановке якоря требуется определить $i(t)$ при начальных условиях в момент времени $t = t_{\text{СР}}$

$$x = x_{\text{К}} = \delta_{\text{Н}} - \delta_{\text{К}}, \quad v = 0, \quad \frac{dv}{dt} = 0. \quad (22)$$

Воспользуемся начальными условиями (20) для нахождения времени трогания $t_{\text{ТР}}$.

Подставляя их в уравнение движения якоря в системе (19) получим:

$$0 = \frac{1}{2} i^2 \frac{b}{a^2} + m_{\text{я}} g - F_0. \quad (23)$$

Решая это уравнение относительно тока, можно найти ток трогания

$$i_{\text{ТР}} = a \sqrt{\frac{2(F_0 - m_{\text{я}} g)}{b}}. \quad (24)$$

Поскольку до начала движения скорость якоря $v = 0$, $\frac{dv}{dt} = 0$, то положение якоря определяется координатой $x = 0$, при этом начальное значение индуктивности обмотки ЭМ согласно уравнению (15) будет $L_{\text{Н}} = \frac{1}{a}$. При этом в системе уравнений (19) решению

подлежит только первое уравнение, которое принимает вид:

$$U = i \cdot R + L_H \frac{di}{dt} . \quad (25)$$

Решение этого уравнения будет

$$i = I_y \left(1 - e^{-\frac{t}{T_H}} \right) ,$$

(26)

где $I_y = \frac{U}{R}$ – установившееся значение тока в катушке ЭМ при его включении на постоянное напряжение источника питания;

$$T_H = \frac{L_H}{R} = \frac{1}{aR} - \text{постоянная времени при } x = 0 \text{ (до начала движения якоря).}$$

Подстановка решения (26) в выражение (16) позволяет определить электромагнитную силу $F_{ЭМ}(t)$, действующую на якорь.

Из решения (26) определим время трогания

$$t_{тр} = T_H \ln \left(\frac{k_3}{k_3 - 1} \right) , \quad (27)$$

где $k_3 = \frac{I_y}{i_{тр}}$ – коэффициент запаса.

Определив начальные условия в момент времени трогания якоря по формулам (24) и (27), можно перейти к следующей стадии расчета переходного процесса, связанной с движением якоря. Для этого запишем систему уравнений (19) в форме Коши:

$$\begin{cases} \frac{di}{dt} = (a - bx) \cdot \left[U - Ri - \frac{b}{(a - bx)^2} \cdot i \cdot v \right] \\ \frac{dv}{dt} = \frac{1}{m_я} \cdot \left[\frac{1}{2} i^2 \frac{b}{(a - bx)^2} - (F_0 + cx) + m_я g \right] \\ \frac{dx}{dt} = v. \end{cases} \quad (28)$$

С математической точки зрения данную систему уравнений можно охарактеризовать как линейную систему дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами третьего порядка, так как она имеет три независимых переменных состояния (ток i , скорость движения якоря v и перемещение якоря x). Для таких систем уравнений общее решение не существует. Их решение может быть получено только численными методами с

использованием пакетов прикладных программ для ПК [2, 3].

В конце хода перемещение и скорость якоря достигают максимальных значений: $x_k = \delta_H - \delta_k$ и v_k соответственно. Пренебрегая процессами соударения якоря с ограничителем хода, будем полагать, что за время дальнейшего увеличения тока до установившегося значения скорость движения якоря остается равной нулю. За время, большее времени срабатывания ЭМ на включение, катушка находится под воздействием напряжения источника питания, при этом только первое уравнение в системе (28) подлежит решению, в этом случае $v = 0$, а постоянная времени переходного процесса будет

$$T_k = \frac{L_k}{R} = \frac{\mu_0 w^2}{\delta_k R}. \quad (29)$$

Уравнение для определения тока в катушке имеет вид:

$$U = i \cdot R + L_k \frac{di}{dt}. \quad (30)$$

Это уравнение решается аналогично уравнению (26), но постоянная времени при этом будет $T_k > T_H$, а именно:

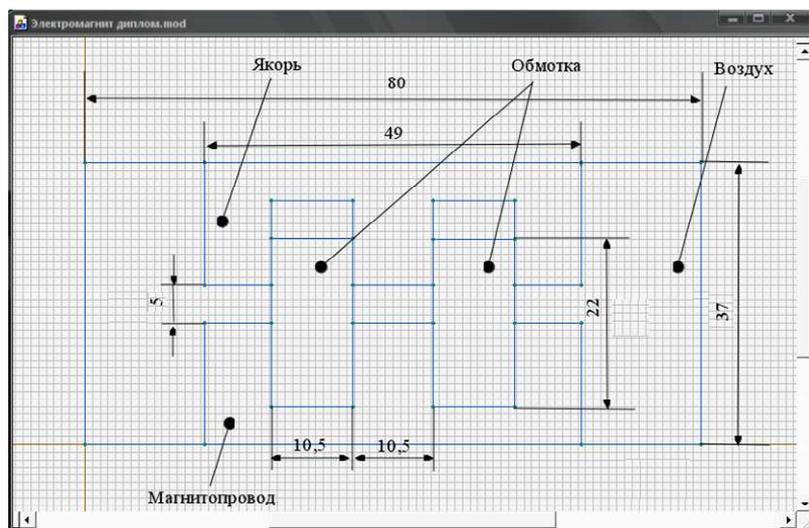
$$i(t) = I_y \left(1 - e^{-\frac{t}{T_k}} \right). \quad (31)$$

Тогда потокосцепление обмотки в конце хода якоря

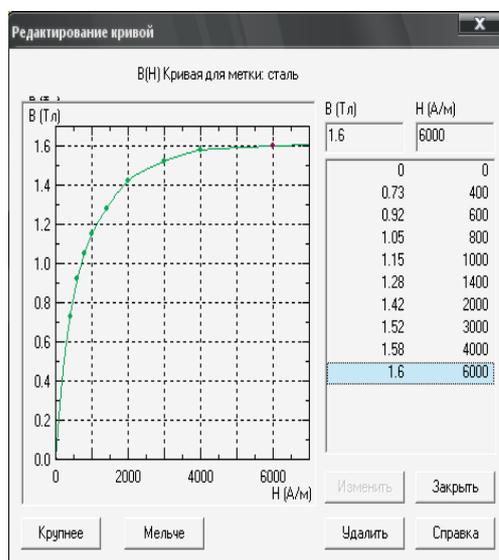
$$\psi(t) = L_k i(t). \quad (32)$$

Для расчета магнитного поля и зависимости инверсной индуктивности обмотки ЭМ от перемещения якоря целесообразно воспользоваться методом конечных элементов, реализованным в комплексе программ Elcut [2, 3], а для решения системы дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами (28) соответственно численными методами пакета Matlab [4].

Выберем в качестве объекта исследования магнитного поля и динамических характеристик ЭМ малогабаритный контактор серии КМИп–10910 с катушкой управления постоянным током [5, 6]. Такие контакторы широко применяются в устройствах защиты автоматики, системах управления промышленными установками и др. Принимая во внимание, что конструкция контактора КМИп–10910 не имеет осевую симметрию и магнитопровод состоит из прямоугольных пластин электротехнической стали, будем считать магнитное поле контактора плоскопараллельным. Основные геометрические размеры контактора серии КМИп–10910 и расчетная область модели на показаны на рис. 3 (все размеры заданы в миллиметрах).



а



б

Рис. 3. Рабочие окна программы Elcut : расчетная область модели (а) и кривая намагничивания стали (б)

Число витков обмотки $w = 5600$, рабочий ток $I_p = 0,5\text{ A}$, намагничивающая сила $I_p w = 2800\text{ A}$, характеристика намагничивания стали задана кривой $B = B(H)$ из справочных данных [2]. Коэффициент заполнения стали $k_3 = 0,9$. Геометрическое сечение среднего стержня $S = 10,5 \times 16,5\text{ мм}^2$. Начальный рабочий зазор $\delta_H = 8\text{ мм}$, конечный рабочий зазор $\delta_K = 0,5\text{ мм}$. Перемещение якоря $0 \leq x \leq 7,5\text{ мм}$. Масса якоря $m_J = 0,12\text{ кг}$. Сопротивление обмотки $R = 586\text{ Ом}$. Жесткость пружины $c = 400\text{ Н/м}$. Сила начального сжатия возвратной пружины $F_0 = 2,1\text{ Н}$.

В ходе решения полевой задачи в комплексе программ Elcut получены картины магнитных полей контактора при различных значениях рабочего зазора (рис. 4). В окне

«Мастера индуктивности» по рассчитанным картинам магнитных полей найдены соответствующие им значения индуктивности (инверсной индуктивности) обмотки (рис. 5).

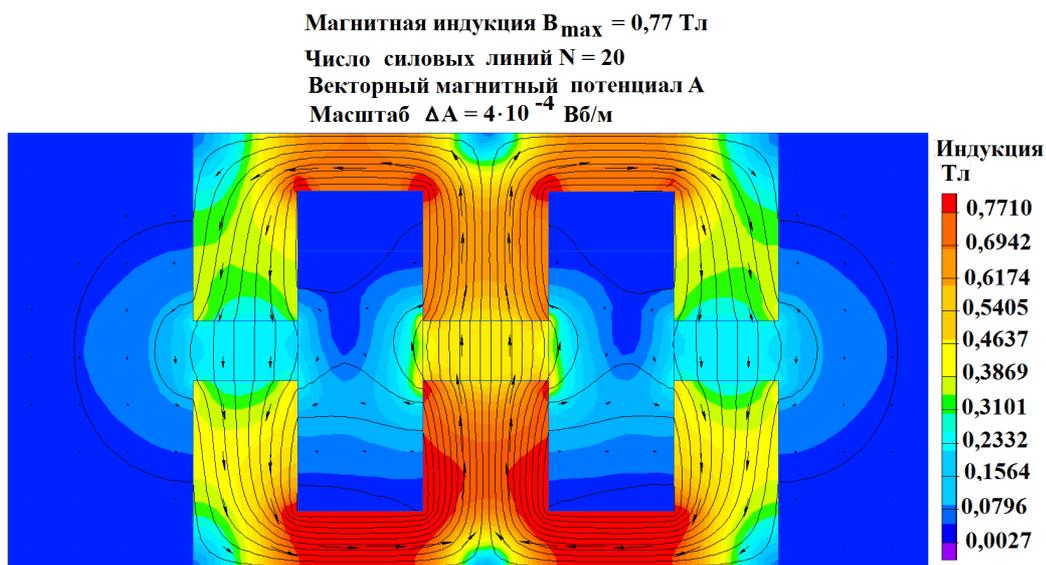


Рис. 4. Цветная картина магнитного поля контактора постоянного тока при зазоре $\delta = 5$ мм

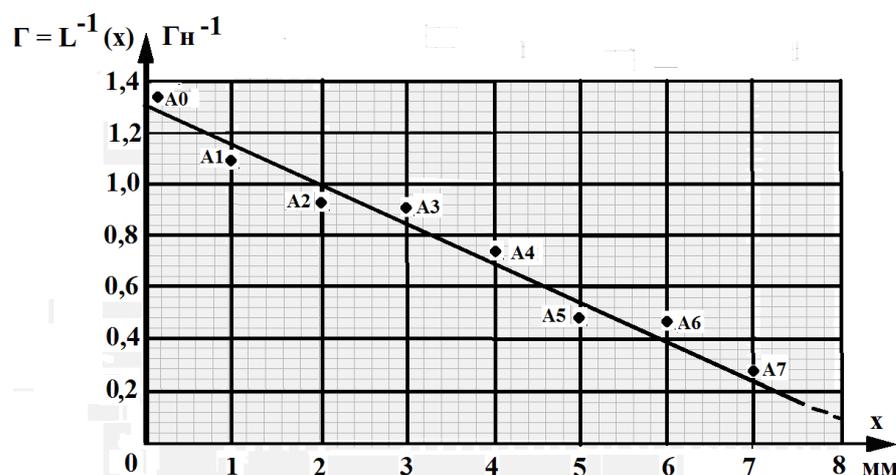


Рис. 5. Аппроксимация зависимости $\Gamma(x) = L^{-1}(x)$ уравнением прямой линии

На графике (рис. 5) расчетные значения инверсной индуктивности обмотки обозначены буквами A_0, A_1, \dots, A_7 . Между расчетными точками на графике показана аппроксимирующая прямая линия. Из рисунка видно, что на большей части хода якоря зависимость инверсной индуктивности обмотки от хода якоря может быть представлена уравнением прямой линии

$$\Gamma(x) = L^{-1}(x) = a - bx = 1,32 - 150 \cdot x, \quad (33)$$

где x – перемещение якоря: измеряется в метрах.

Результатом численного расчета системы дифференциальных уравнений (28) в пакете Matlab являются динамические характеристики контактора, графики которых изображены на рис. 6 (а – ток, б – перемещение, в – скорость якоря). При этом ток трогания контактора на включение составляет $i_{тр} = 146$ мА, а время срабатывания $t_{ср} = 75$ мс.

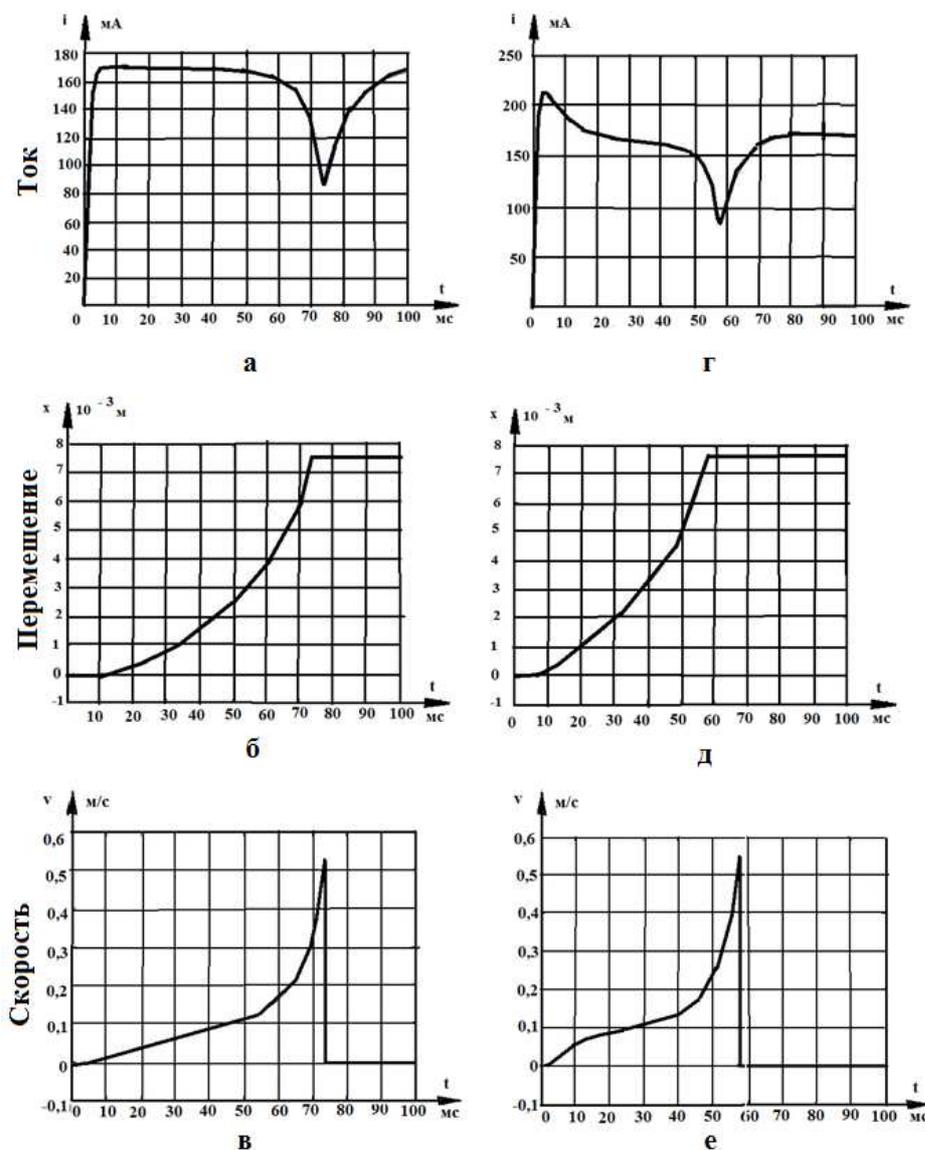


Рис. 6. Динамические характеристики контактора постоянного тока серии КМИп–10910
 а, б, в – без учета процесса форсировки процесса срабатывания ($U = 100$ В);
 г, д, е – с учетом форсировки процесса срабатывания ($U = 140$ В, $R_d = 250$ Ом, $C = 40$ мкФ)

Для уменьшения времени срабатывания контактора можно уменьшить ход или уменьшить массу якоря и связанных с ним подвижных частей. Однако часто конструктивные методы не дают желаемого результата, поэтому используются схемные решения, такие как схема, приведенная на рис. 7.

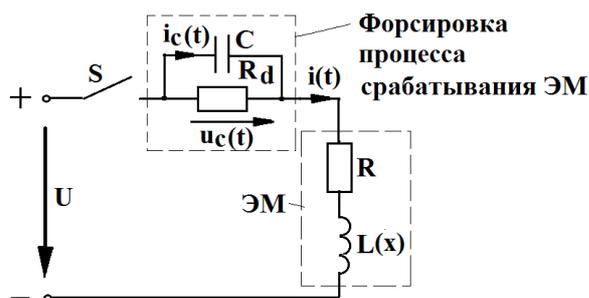


Рис. 7. Схема уменьшения времени срабатывания ЭМ

На схеме последовательно с обмоткой контактора включен добавочный резистор R_d , шунтируемый конденсатором. Напряжение питания в этой схеме увеличивают, чтобы сохранилось прежним установившееся значение тока в обмотке ЭМ. Согласно схеме форсировка процесса срабатывания ЭМ сводится к тому, что в первый момент после подачи напряжения источника питания незаряженный конденсатор создает дополнительный путь для тока. Обмотка ЭМ включается на полное напряжение источника питания, что приводит к увеличению тока и уменьшению времени трогания, а значит уменьшению времени срабатывания. Переходный процесс при этом описывается системой дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \frac{di}{dt} = (a - bx) \cdot \left[U - Ri - \frac{b}{(a - bx)^2} \cdot i \cdot v - u_c \right] \\ \frac{dv}{dt} = \frac{1}{m_{я}} \cdot \left[\frac{1}{2} i^2 \frac{b}{(a - bx)^2} - (F_0 + cx) + m_{я} g \right] \\ \frac{dx}{dt} = v \\ \frac{di_c}{dt} = \left(i - \frac{u_c}{R_d} \right) \cdot \frac{1}{C} \end{cases} \quad (34)$$

при заданных начальных условиях (в момент времени $t=0$)

$$x = 0, \quad i = 0, \quad v = 0, \quad \frac{dv}{dt} = 0, \quad i_c = 0, \quad u_c = 0$$

Результаты решения системы уравнений (34), учитывающей форсировку процесса срабатывания контактора постоянного тока серии КМИп-10910, представлены на рис. 6 (г – ток, д – перемещение, е – скорость якоря). Время срабатывания контактора на включение составляет $t_{cp} = 57$ мс.

Предложенный алгоритм расчета динамических характеристик электромагнита постоянного тока, построенный на основе численного расчета картин магнитного поля в комплексе программ Elcut и решения системы дифференциальных уравнений динамики ЭМ

в пакете Matlab могут быть использованы при анализе конкретных конструкций и оптимальном проектировании ЭМ по заданным динамическим характеристикам.

Список литературы

1. Выбор и применение низковольтных электрических аппаратов распределения, управления и автоматики. Справочное пособие. Авторы / составители: Соколов В.П., Акимов Е.Г., Коробков Ю.С., Таланов Е.В. – Изд-во: МЭИ, 2009. – 344 с.
2. Расчет электрических и магнитных полей методом конечных элементов с применением комплекса программ ELCUT. Учебное пособие / Попов А.П. Татевосян А.С., Андреева Е.Г., Чугулев А.О. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010. – 84 с.
3. Руководство для малогабаритных контакторов серии КМИ.: <http://www.iek.ru/>
4. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; Спб.: Питер, 2008. – 288 с.
5. Чунихин А.А. Электрические аппараты. – М.: Альянс, 2008. – 720 с.
6. ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Руководство пользователя. Версия 5.5. – М.:ПК TOP, г. С-Пб, 1989. – 2007. – 293 с.

Рецензенты:

Захаренко В.А., д.т.н., старший научный сотрудник ООО Научно-производственного центра «Термаль», г. Омск;

Федоров В.К., д.т.н., профессор кафедры «Электротехники и электрофикации» Омского государственного аграрного университета им. П.А. Столыпина, г. Омск.