

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ МЕХАНИЗМОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА С МАГНИТНОЙ ЗАЩЕЛКОЙ

*У статті розглянуто питання математичного моделювання динамічних процесів, що відбуваються у електромагнітному механізмі з магнітною клямкою та форсированою катушкою. Наведено динамічні характеристики спрацьовування електромагнітного механізму. Дані якісні та кількісні оцінки отриманих результатів.*

*В статье рассматривается вопрос математического моделирования динамических процессов, происходящих в электромагнитном механизме с магнитной защёлкой и форсированной катушкой. Приведены динамические характеристики срабатывания электромагнитного механизма. Даны количественные и качественные оценки полученных результатов.*

### ВВЕДЕНИЕ

Появление в последние годы высококоэрцитивных постоянных магнитов привело к существенному изменению в конструкциях электромагнитных приводов. Все большее количество зарубежных производителей (например, АВВ) в качестве привода используют электромагнитные механизмы с магнитной защёлкой. Аналогичные тенденции имеют место и в Украине [1-3]. Основными элементами конструкции таких приводов являются: катушка, работающая кратковременно в форсированном режиме; магнитная система, закрепленная на немагнитном основании; высококоэрцитивные постоянные магниты.

Преимущество таких электромагнитных систем заключается в следующем: катушка электромагнита находится под напряжением доли секунды, нагрев её незначителен, поэтому габариты невелики; при прижатом якоре система не потребляет энергии от электрической цепи; за счет форсировки катушки, быстродействие такого привода достаточно велико; общие габариты электромагнита определяются только индукцией насыщения, а не размерами катушки.

Статический расчет такой системы не вызывает особых сложностей и может быть проведен различными программными комплексами, например FEMM. Но наибольший интерес представляет расчет динамики таких систем для определения быстродействия электромагнитного привода. Попытка решения данной задачи приближенными методами дает неточный результат и не может считаться успешной. В результате обзора литературы по данному вопросу было установлено полное отсутствие данных по более-менее точному расчету динамических характеристик таких систем.

Поэтому, решение данной задачи актуально, так как позволяет определить динамические характеристики приводного электромагнита с магнитной защёлкой, влияющие на надежность работы аппарата в целом.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Постановка задачи заключается в проведении расчета динамики включения электромагнитного механизма с магнитной защёлкой, катушка которого включается на импульсное напряжение с учетом проводимости и нелинейных свойств материала магнитопровода. Рассчитываемый электромагнит планировалось использовать в качестве привода проектируемого электротехнического объекта. Цель данной статьи – получить динамические характеристики спроектированного электромагнита. Решаемые для достижения поставленной цели задачи: провести расчет электромагнитного поля в нелинейной и неоднородной среде с учетом проводимости материала магнитопровода; провести расчет электрической цепи с учетом изме-

няющегося магнитного поля; провести расчет движения якоря электромагнита.

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧИ

Вид электромагнита показан на рис. 1. Области D1 – D3 – ферромагнетик; D4 – катушка; D5 – постоянный магнит; D6 – окружающее пространство. Такое положение магнита выбрано в связи с большей наглядностью получаемых результатов (направление движения и значения электромагнитной силы имеют положительное значение). Данная задача решается на деформируемой сетке, причем, величина и скорость деформации сетки вокруг якоря определяется параметрами движения якоря.

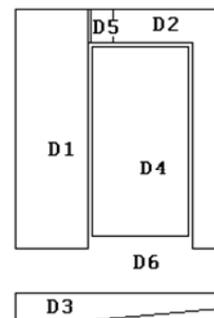


Рис. 1. Расчетная модель электромагнита

Уравнения электромагнитного поля для задачи с осевой симметрией без учета токов смещения можно записать через векторный магнитный потенциал для каждой из рассматриваемых областей:

$$\begin{aligned} \sigma \cdot \frac{\partial A_\varphi}{\partial t} + \nabla \times (\mu^{-1} \cdot \nabla \times A_\varphi) &= 0, \text{ если } D \in D1, D2, D3; \\ \mu^{-1} \cdot \nabla \times (\nabla \times A_\varphi) &= J_\varphi, \text{ если } D \in D4; \\ \nabla \times (\mu^{-1} \cdot (\nabla \times A_\varphi - B_r)) &= 0, \text{ если } D \in D5; \\ \mu^{-1} \cdot \nabla \times (\nabla \times A_\varphi) &= 0, \text{ если } D \in D6. \end{aligned} \quad (1)$$

В (1) предполагается, что электрическая проводимость  $\sigma$  постоянного магнита, катушки (ток распределен равномерно по сечению) и окружающего пространства практически равны нулю. Свойства постоянного магнита задаются остаточной индукцией  $B_r$  и относительной магнитной проницаемостью, определяемой на основании  $B_r$  и  $H_c$ . В (1) плотность тока катушки  $J_\varphi$  определяется на основании уравнения для электрической цепи. Так как катушка намотана равномерно распределенным по сечению проводом, то пренебрегая неравномерностью тока в отдельном проводящем витке для электрической цепи можно

записать уравнение:

$$R \cdot i(t) + \frac{w}{S} \cdot \iiint_V \frac{\partial A_\varphi}{\partial t} \cdot dV = U(t), \quad (2)$$

где  $R$ ,  $w$ ,  $S$ ,  $V$  – активное сопротивление, число витков, площадь поперечного сечения и объем катушки соответственно;  $i(t)$  – ток катушки;  $U(t)$  – напряжение на катушке, имеющее форму, показанную на рис 2.

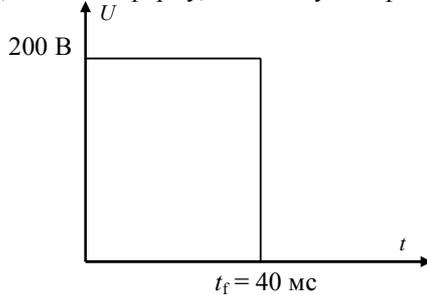


Рис. 2. Вид напряжения, приложенного к катушке электромагнита

Полученная система уравнений (1, 2) должна быть дополнена уравнением движения якоря:

$$\begin{cases} m \cdot \frac{dv(t)}{dt} = Q(t) - P(z) \\ \frac{dz(t)}{dt} = v(t) \end{cases} \quad (3)$$

Уравнение (3) представляет собой уравнение движения тела с постоянной массой, где  $m$  – масса якоря и движущихся с ним тел;  $v(t)$  – скорость;  $Q(t)$  – электромагнитная сила;  $P(z)$  – противодействующая сила;  $z(t)$  – координата положения якоря.

Электромагнитная сила определяется выражением на основании тензора Максвелла в цилиндрической системе координат:

$$Q = \iint_{S_{pov}} (-0,5 \cdot (H_r \cdot B_r + H_z \cdot B_z) \cdot \mathbf{n}_z \cdot dS_{pov} + \iint_{S_{pov}} ((\mathbf{n}_r \cdot H_r + \mathbf{n}_z \cdot H_z) \cdot B_z) \cdot dS_{pov}, \quad (4)$$

где  $\mathbf{n}$  – вектора внешней нормали к поверхности якоря  $S_{pov}$ .

Система (1-4) должна быть дополнена начальными условиями, которые для уравнений (2, 3) будут нулевыми. Начальное условие для (1) запишется так:

$$A_\varphi(0, r, z) = f(r, z), \quad (5)$$

где  $f(r, z)$  – распределение магнитного потенциала в расчетных областях при обесточенной катушке, полученное на основании решения стационарной задачи для векторного магнитного потенциала (система уравнений 6) при наличии в системе постоянного магнита.

$$\begin{aligned} \nabla \times (\mu^{-1} \cdot \nabla \times A_\varphi) &= 0, \text{ если } D \in D1, D2, D3; \\ \mu^{-1} \cdot \nabla \times (\nabla \times A_\varphi) &= 0, \text{ если } D \in D4; \\ \nabla \times (\mu^{-1} \cdot (\nabla \times A_\varphi - B_r)) &= 0, \text{ если } D \in D5; \\ \mu^{-1} \cdot \nabla \times (\nabla \times A_\varphi) &= 0, \text{ если } D \in D6. \end{aligned} \quad (6)$$

Уравнения (1, 6) должны быть дополнены граничными условиями, задающими значение магнитного потенциала на внешней границе рассматриваемой области и на оси симметрии.

#### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА

В качестве основных исходных данных были заданы: значение и форма напряжения электрической цепи; число витков катушки; начальная противодействующая сила; массы движущихся тел; активное сопротивление катушки; параметры постоянного магнита. Для ферромагнитного сердечника и якоря задавалось значение относительной магнитной проницаемости в функции модуля магнитной индукции (рис. 3). Расчеты динамики проводились для электрической проводимости материала электромагнита равной 20 MS/m. Это значение соответствует проводимости конструкционных сталей, таких как Ст3, Ст10, Ст20.

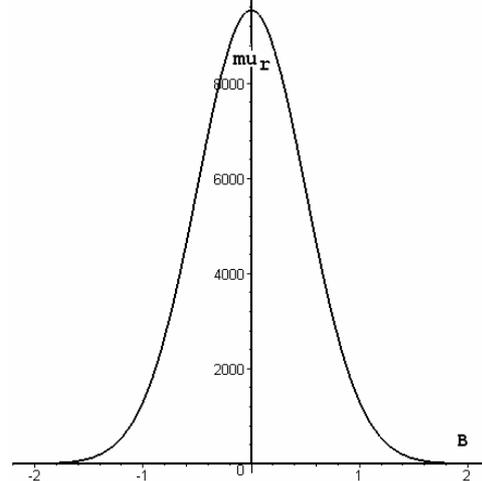


Рис. 3. Кривая относительной магнитной проницаемости

#### РЕШЕНИЕ ПОСТАВЛЕННОЙ ЗАДАЧИ

Решение задачи проводилось численными методами (метод конечных элементов) в нестационарном режиме на деформируемой сетке решателем с автоматическим (в зависимости от получаемого результата) выбором временного шага для временного интервала (0-0,1) с.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Результаты решения представлены в виде графиков. На рис. 4 показаны графики временной зависимости тока катушки при включении ее на импульсное напряжение.

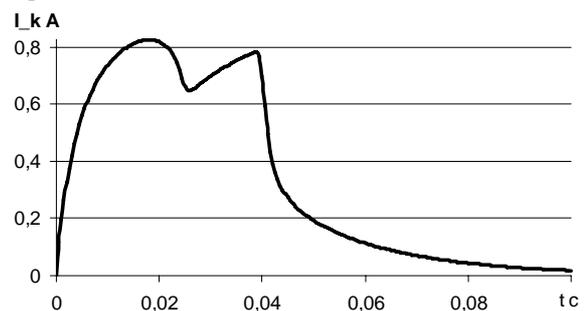


Рис. 4. Временная зависимость тока катушки времени

Расчеты показывают, что предварительное подмагничивание системы постоянным магнитным потоком уменьшает время срабатывания электромагнитного механизма. Данный результат можно объяснить уменьшением начальной эквивалентной индуктивности системы за счет потока подмагничивания системы.

На рис. 5 показано значение электромагнитной силы, действующей на якорь. Из рис. 5 видно, что электромагнитная сила начинается с некоторого ненулевого значения и спадает до значения, определяемого параметрами постоянного магнита, значением

эквивалентного конечного зазора и сечением магнитопровода.

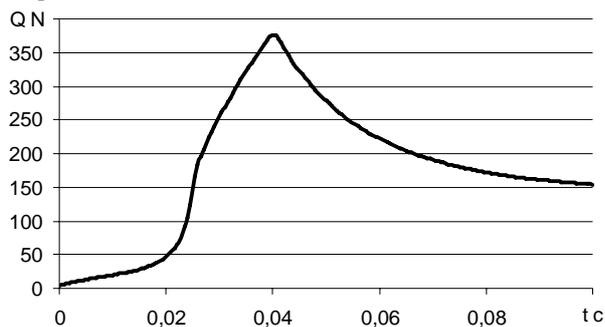


Рис. 5. Временная зависимость электромагнитной силы

На рис. 6 показано изменение модуля магнитного потока в сердечнике.

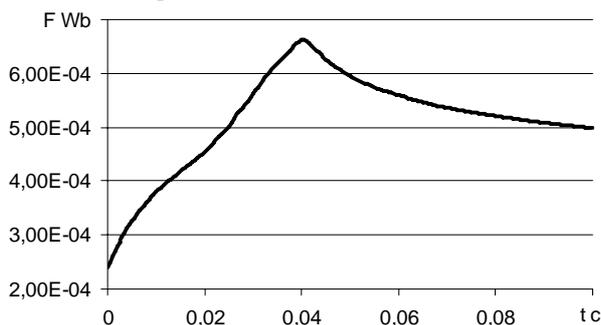


Рис. 6. Временная зависимость магнитного потока

На рис. 7 приведен график противо-ЭДС катушки, имеющий довольно сложную форму.

На рис. 8 показана временная зависимость наведенных в сердечнике вихревых токов, которые могут достигать значений в сотни ампер, а на рис. 9 показана зависимость хода якоря от времени, позволяющая определить моменты трогания якоря и его остановки.

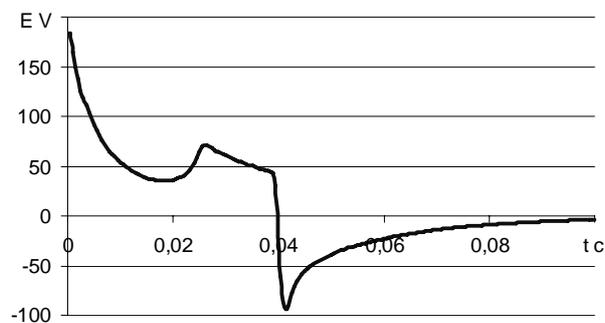


Рис. 7. Временная зависимость противоЭДС катушки

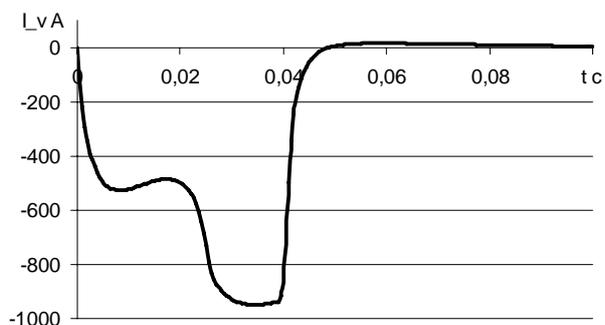


Рис. 8. Временная зависимость вихревого тока в сердечнике

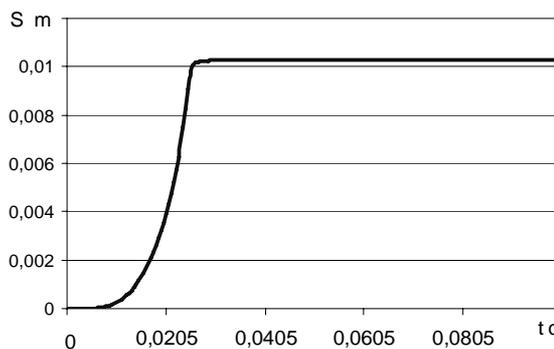


Рис. 9. Зависимость хода якоря от времени

## ВЫВОДЫ

Разработана математическая модель динамики включения электромагнита постоянного тока с магнитной защелкой, позволяющая проводить точные расчеты (в пределах точности входных параметров) таких систем на основании решения мультифизической задачи, базирующейся на решении уравнений электромагнитного поля.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клименко Б.В., Бугайчук В.М., Гречко А.М. Электромагнитные приводы вакуумных выключателей средних напряжений // Вестник Национального технического университета "Харьковский политехнический институт". – Харьков: НТУ "ХПИ", 2004. – № 42. – С. 73-80.
2. Клименко Б.В., Бугайчук В.М., Гречко А.М. Опытный образец двухпозиционного привода вакуумного выключателя среднего напряжения // Электротехника и электромеханика – Харьков, 2005. – №2. С. 23-27.
3. Клименко Б.В., Бугайчук В.М., Гречко А.М., Выронец С.В. Быстродействующий электромагнитный привод с вытеснением магнитного поля для вакуумного выключателя среднего напряжения // Электротехника и электромеханика – Харьков, 2006. – №4. С. 22-26.

Поступила 20.09.2009

Байда Евгений Иванович, к.т.н., доц.  
Национальный технический университет  
"Харьковский политехнический институт"  
Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21  
НТУ "ХПИ", кафедра "Электрические аппараты"  
тел. (057) 707-69-76

*E.I. Bayda*

### Modeling of dynamic characteristics of DC electromagnetic mechanisms with a magnetic latch.

The paper considers a problem of mathematical modeling of dynamical processes in an electromagnetic mechanism with a magnetic latch and coil forcing. Dynamic characteristics of the electromagnetic mechanism operation are presented. Quantitative and qualitative estimations of obtained results are given.

**Key words** - DC electromagnetic mechanism, dynamic characteristics, mathematical modeling.