

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОТКЛЮЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТА ПОСТОЯННОГО ТОКА С МАГНИТНОЙ ЗАЩЁЛКОЙ

*У статті розглянуто питання математичного моделювання відключення електромагнітного механізму з магнітною защілкою за допомогою розряду на катушку відключення ємнісного накопичувача енергії. Наведено динамічні характеристики електромагнітного механізму. Дані якісні та кількісні оцінки отриманих результатів.*

*В статті розглядається питання математичного моделювання процесу відключення електромагнітного механізму магнітної защілки при допомозі розряду на відключаючу катушку ємнісного накопичувача енергії. Приведено динамічні характеристики електромагнітного механізму. Дані кількісні та якісні оцінки отриманих результатів.*

### ВВЕДЕНИЕ

В ранее опубликованных статьях были рассмотрены вопросы математического моделирования динамики срабатывания форсированного электромагнитного механизма постоянного тока с магнитной защёлкой, в которых рассматривалась математическая модель системы и получены количественные характеристики. Следующим важным этапом изучения физических процессов в таком электромагните является процесс отключения. Ввиду того, что во включенном состоянии катушка электромагнита обесточена, а удержание якоря осуществляется за счет энергии постоянного магнита, отключение таких систем осуществляется, как правило, путем разряда на катушку ёмкостного накопителя энергии соответствующей полярности. Для успешного отключения такого электромагнита необходимо правильно выбрать ёмкость и напряжение конденсатора с учетом электрических и магнитных параметров катушки, а так же динамических характеристик движущихся элементов. В противном случае, ампервитков отключения может быть недостаточно для перераспределения магнитных потоков, либо за время разряда конденсатора якорь не успеет отойти на расстояние, обеспечивающее его дальнейшее движение. Получить ответы на все поставленные вопросы можно только на основании соответствующей математической модели представляющую собой мультифизическую задачу по расчету магнитных, электрических и механических процессов, происходящих в электромагните.

Основная сложность данной задачи заключается в необходимости моделирования электромагнитного поля в неоднородной и нелинейной среде.

Решение данной задачи актуально, так как позволяет понять физику процессов, происходящих в такой системе, а так же определить оптимальные параметры системы.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Постановка задачи заключается в проведении расчета динамики отключения электромагнитного механизма с магнитной защёлкой, катушка которого включается на ёмкостной накопитель с учетом проводимости и нелинейных свойств материала магнитопровода. Цель данной работы – получить динамические характеристики отключения спроектированного электромагнита и определить параметры емкости,

обеспечивающие процесс отключения устройства.

В работе: проведен расчет электромагнитного поля в нелинейной среде с учетом проводимости материала магнитопровода; проведен расчет движения якоря с учетом изменяющегося электромагнитного поля; проведен расчет электрической цепи с учетом изменяющегося магнитного поля и движения якоря.

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧИ

Вид электромагнита в осесимметричной системе показан на рис. 1. Наличие воздушного шунта обусловлено встречными направлениями потоков постоянного магнита и катушки в режиме отключения и гарантирует неразмагничивание постоянного магнита в процессе отключения.

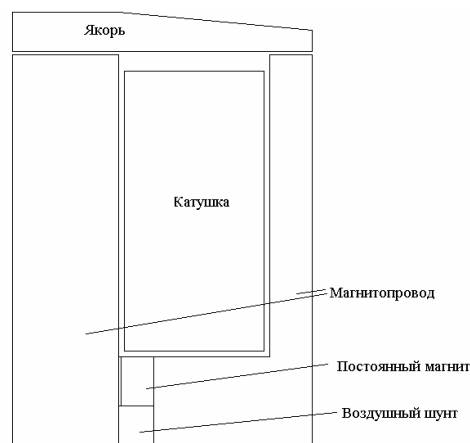


Рис. 1. Расчетная модель ИДМ

Уравнения векторного магнитного потенциала в нестационарной постановке для задачи с осевой симметрией без учета токов смещения известны.

Предполагается, что электрическая проводимость  $\sigma$  постоянного магнита и окружающего пространства практически равны нулю. Ток катушки распределен равномерно по сечению. Свойства постоянного магнита задаются остаточной индукцией  $B_r$  и относительной магнитной проницаемостью, определяемой на основании  $B_r$  и  $H_c$ . Плотность тока катушки 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:

$$R \cdot \frac{dq(t)}{dt} + \frac{w}{S} \cdot \iiint_V \frac{\partial A_\Phi}{\partial t} \cdot dV = U_{c0} - \frac{q(t)}{C}, \quad (1)$$

где  $q(t)$  – количество электричества;  $R$  – активное сопротивление катушки;  $w$  – число витков катушки;  $S$  – площадь поперечного сечения катушки;  $V$  – объем катушки;  $U_{c0}$  – напряжение на емкости;  $C$  – емкость конденсатора.

Уравнения движения якоря известны и были подробно рассмотрены в предыдущих статьях. Отличием данной системы является лишь то, что в качестве движущих сил выступает сила пружины отключения.

Для однозначности решения задача должна быть дополнена начальными условиями, которые для уравнений поля запишутся в виде:

$$A_\Phi(0, r, z) = f(r, z), \quad (2)$$

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

#### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА

В качестве основных исходных данных были заданы: приведенная масса якоря – 0,3 кг; активное сопротивление катушки – 100 Ом; число витков – 3000; напряжение на емкости – 90 В; емкость –  $50 \cdot 10^{-6}$  Ф; противодействующая сила – 100 Н.

Для ферромагнитного сердечника и якоря задавалось значение относительной магнитной проницаемости в функции модуля магнитной индукции. Расчеты динамики проводились для электрической проводимости материала электромагнита равной 10 MS/m.

#### 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 (0–0,07 с). Расчеты проводились для хода якоря 5 мм и 10 мм.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

На рис. 2 показана картина начального распределения магнитного поля в электромагните, из которого следует:

- магнитный поток равномерно распределен по площади поперечного сечения магнитопровода;
- практически весь поток постоянного магнита протекает через рабочие воздушные зазоры;
- магнитный поток, замыкающийся через шунт, незначителен.

На рис. 3 показано распределение вертикальной составляющей магнитной индукции в среднем сечении электромагнита в начальный момент времени. Данные рис. 3 подтверждают предположение о равномерности распределения магнитного потока по сечению магнитопровода.

На последующих рисунках показаны результаты расчета динамики отключения электромагнитного механизма с магнитной защёлкой.

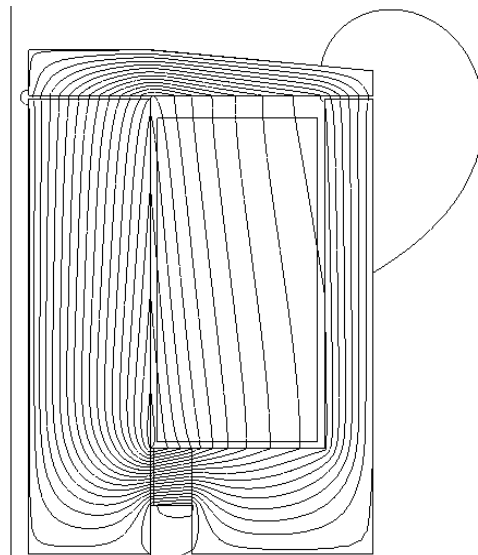


Рис. 2. Начальное распределение поля в электромагните

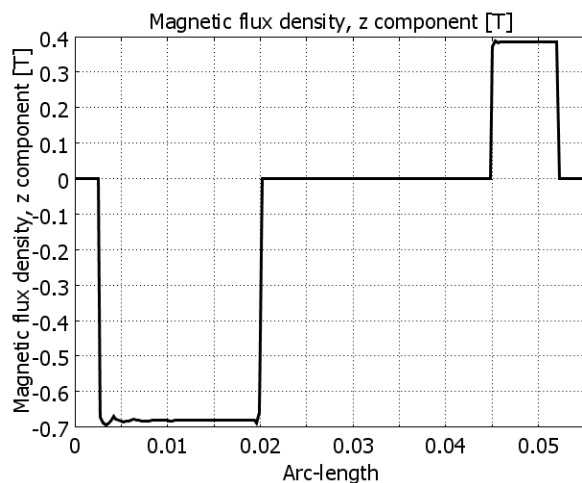


Рис. 3. Начальное распределение поля в электромагните

На рис. 4 показано изменение электромагнитной силы, удерживающей якорь электромагнита, которая изменяется от 220 Н до 5 Н. Так как начальная сила, удерживающая якорь, равняется 220 Н (см. рис. 2), то для отключения электромагнита необходимо иметь определенное значение ёмкости, заряженной до определенного напряжения. Для данной конструкции электромагнита были подобраны минимальное значение напряжения заряда ёмкости – 90 В и минимальное значение ёмкости конденсатора – 50 мкФ. При уменьшении указанных параметров срабатывание электромагнита не наблюдается.

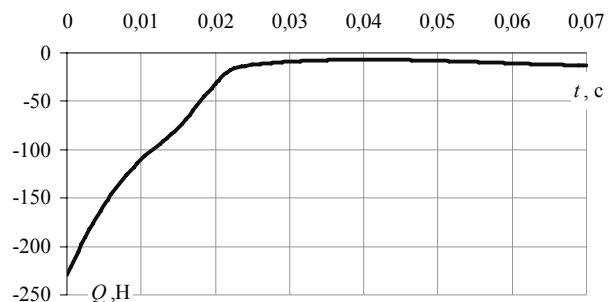


Рис. 4. Значение электромагнитной силы в функции времени

На рис. 5 показано временное изменение тока катушки, а на рис. 6 – изменение напряжения на конденсаторе.

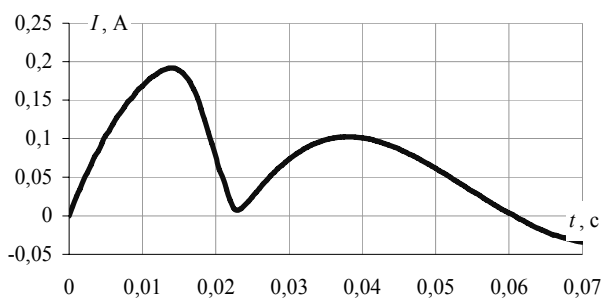


Рис. 5. Временная зависимость тока катушки при ходе якоря 5 мм

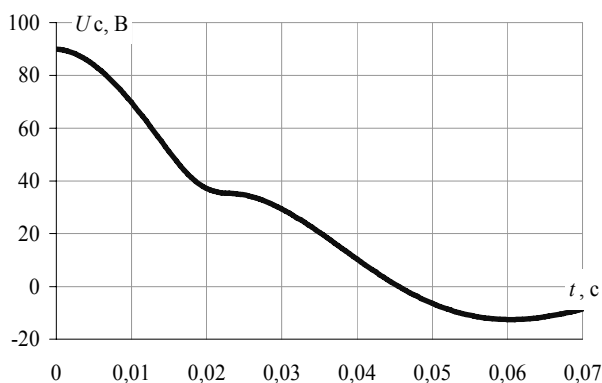


Рис. 6. Зависимость напряжения на ёмкости от времени при ходе якоря 10 мм

На рис. 7 показано значение хода от времени, а на рис. 8 – значение противоЭДС катушки.

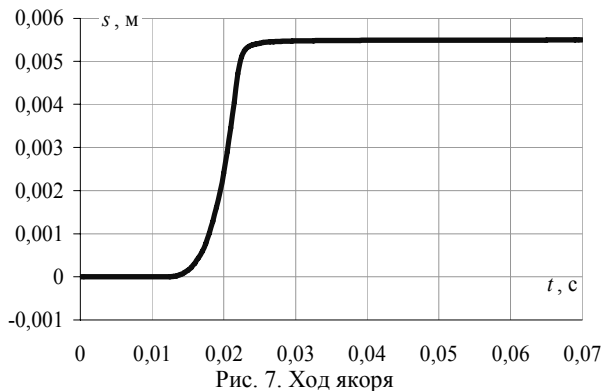


Рис. 7. Ход якоря

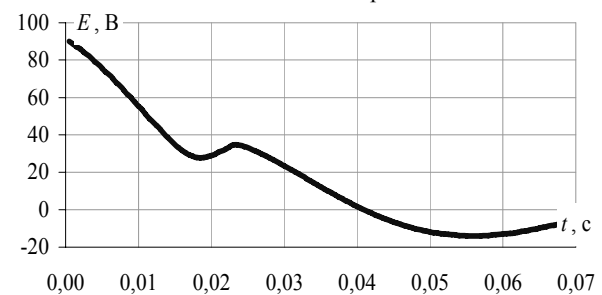


Рис. 8. ЭДС, наводимая в катушке

Анализ графиков показывает, что в конце хода якоря противоЭДС движения уравновешивает напряжение на конденсаторе, а после остановки якоря немного его подзаряжает.

С точки зрения изучения физических процессов,

происходящих в ферромагнитном магнитопроводе при встречном направлении магнитных потоков, создаваемых постоянным магнитом и катушкой, интерес представляет распределение осевой составляющей магнитной индукции в различные моменты времени.

На рис. 9-13 показано распределение осевой составляющей магнитной индукции в среднем сечении электромагнита в различные моменты времени от начала процесса разряда конденсатора на катушку.

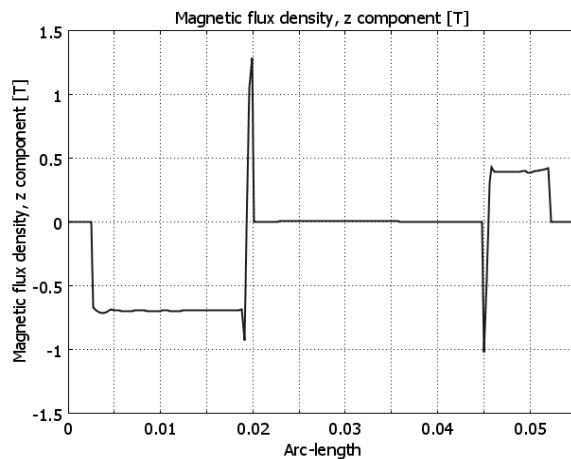


Рис. 9. Распределение магнитной индукции по сечению через 5 мс после начала процесса

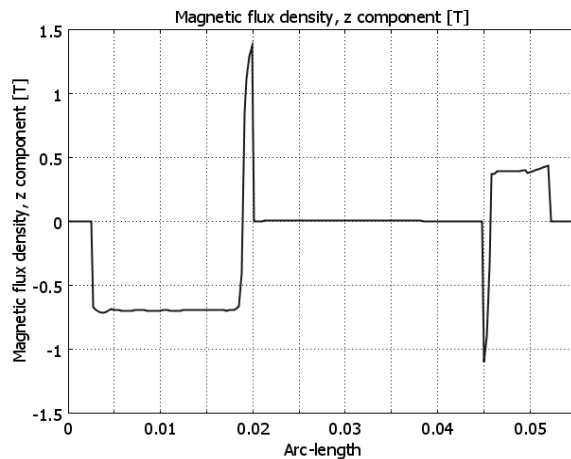


Рис. 10. Распределение магнитной индукции по сечению через 10 мс после начала процесса

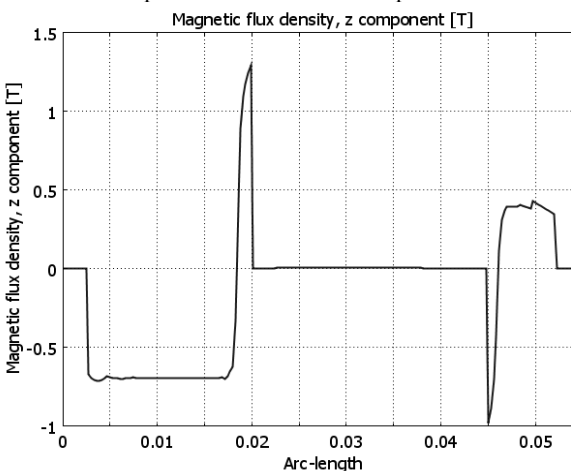


Рис. 11. Распределение магнитной индукции по сечению через 20 мс после начала процесса

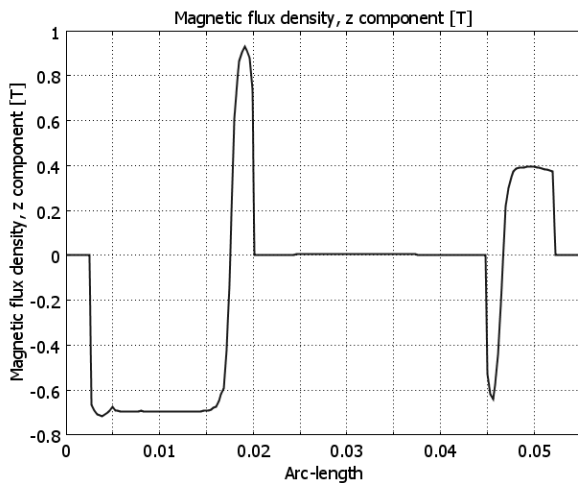


Рис. 12. Распределение магнитной индукции по сечению через 50 мс после начала процесса

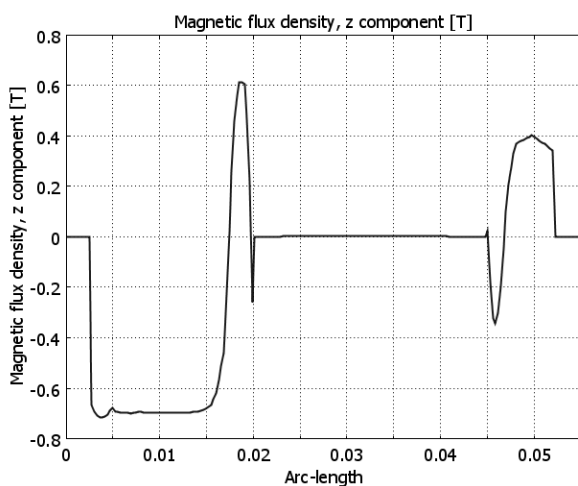


Рис. 13. Распределение магнитной индукции по сечению через 70 мс после начала процесса

Такое распределение магнитной индукции обусловлено поверхностным электромагнитным эффектом. На рис. 14 показано распределение плотности вихревых токов в том же сечении магнитопровода в момент времени 70 мс после начала процесса.

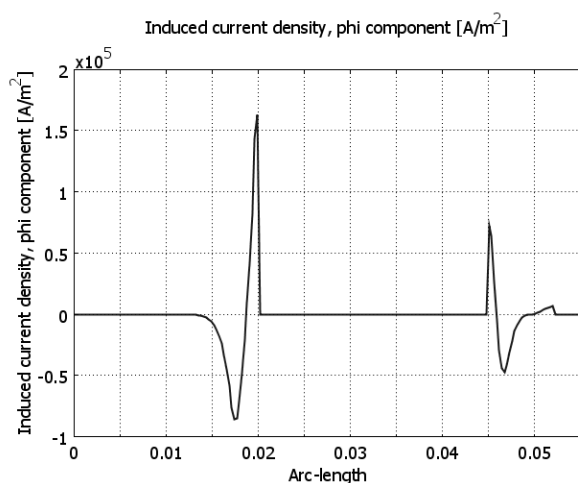


Рис. 14. Распределение плотности вихревых токов по сечению магнитопровода через 70 мс

В заключении, необходимо отметить, что увеличение хода якоря с 5 до 10 мм незначительно (на 2 мс) увеличивает время отпущания электромагнита за счет достаточно высокой скорости движения якоря. Более существенно изменяется характер тока катушки, показанный на рис. 15.

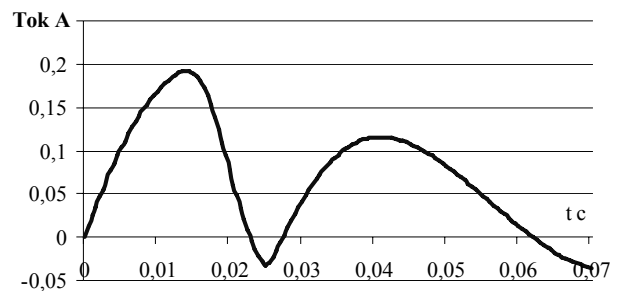


Рис. 15. Временная зависимость тока катушки при ходе якоря 10 мм

Как следует из рис. 15, ток катушки электромагнита меняет направление, в большей степени осуществляя процесс подзарядки ёмкости.

### ВЫВОДЫ

На базе разработанной математической модели динамики отключения электромагнита постоянного тока с магнитной защелкой были проведены (и могут проводиться в дальнейшем, но с другими начальными данными) расчеты по определению времени отпущания якоря, оптимизации значений ёмкости и напряжения её заряда. Построенная математическая модель дает возможность более полно понять процессы, происходящие в такого рода системах.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. COMSOL multiphysics.

Поступила 20.01.2010

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-mail: baida@kpi.kharkov.ua

Bayda E.I.

### Modeling of cutting of a DC electromagnet with a magnetic latch.

The paper considers a problem of mathematical modeling of cutting of an electromagnetic mechanism with a magnetic latch with a discharge. 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.**