

## РАСЧЕТ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ МЕХАНИЗМЕ НА ОСНОВАНИИ УРАВНЕНИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Байда Е.И., к.т.н.

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"

Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", кафедра "Электрические аппараты"

тел./факс (0572) 40-08-55, E-mail: baida@kpi.kharkov.ua.

*Розглянута математична модель з розрахунку перехідних процесів в електромагнітному механізмі на засаді теорії електромагнітного поля з використанням програми Femlab. Отримано залежність розподілу магнітного потоку та наведених струмів магнітопроводу у перехідних режимах. Зроблені висновки о можливій швидкодії електромагнітного механізму.*

*Рассмотрена математическая модель по расчету переходных процессов в электромагнитном механизме на основании теории электромагнитного поля с использованием программы Femlab. Получено распределение магнитного потока и вихревых токов магнітопровода в переходных режимах. Сделаны выводы о возможном быстродействии электромагнитного механизма.*

В некоторых случаях при проектировании электромагнитных механизмов требуется расчеты переходных процессов в электрических и магнитных цепях. Одним из таких устройств был электромагнит, показанный на рис. 1.

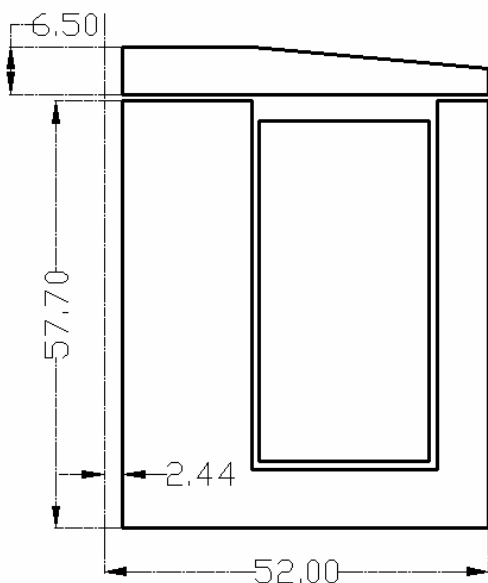


Рис. 1. Спроектированный электромагнит

Согласно техническому заданию, данный электромагнит должен использоваться в качестве привода, заменяющего шаговый двигатель. Причем, частота срабатывания должна быть не ниже 1 Гц при усилии не меньше 350 Н и ходе 0,15 мм при начальном зазоре в 1 мм. Специфика работы спроектированного электромагнитного механизма требует расчета переходных процессов как при включении катушки на постоянное напряжение, так и процессов, происходящих при отключении катушки от источника питания. В расчетах ввиду малости хода, его влияние на переходные процессы можно не учитывать и проводить расчет при постоянном значении воздушного зазора.

Следовательно, целью данной работы является расчет переходных процессов в электромагнитном

устройстве с ферромагнетиком по уравнениям теории поля.

Необходимо отметить, что основной сложность таких процессов является учет размагничивающего действия вихревых токов и магнитный поверхностный эффект, заключающийся в вытеснении магнитного потока в переходных режимах. В литературе [1] предложен ряд способов учета этих эффектов, однако, эти расчеты достаточно приближенные и оценить их точность можно только косвенными методами. Наиболее точные расчеты возможны только на основании совместного решения уравнений электромагнитного поля в нестационарном режиме и уравнения электрической цепи катушки электромагнита.

Запишем уравнения Максвелла без учета токов смещения, которыми при существующих в системе частотах можно пренебречь.

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{\delta}; \text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}. \quad (1)$$

Уравнения (1) общеизвестны и не нуждаются в расшифровке. При подстановке в (1) соотношения

$$\vec{B} = \text{rot } \vec{A} \text{ и учтя, что } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \text{grad } \varphi [2], \text{ получим}$$

уравнение для расчета переходных процессов в электромагнитном поле без учета токов смещения:

$$\text{rot} \left( \frac{1}{\mu} \cdot \text{rot } \vec{A} \right) = \sigma \cdot \left( -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \vec{E}_{st} \right) \quad (2)$$

или  $\text{rot} \left( \frac{1}{\mu} \cdot \text{rot } \vec{A} \right) + \sigma \cdot \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \vec{J}_{st}$

где  $\vec{A}$  - векторный магнитный потенциал;  $\vec{E}_{st}$  и  $\vec{J}_{st}$  - напряженность поля и плотность тока сторонних источников энергии с учетом числа витков катушки.

Применительно к рассматриваемому осесимметричному электромагниту, векторный магнитный потенциал и сторонние источники энергии будут иметь только угловую компоненту.

Следующей задачей является запись уравнения электрической цепи для совместного решения с уравнением (2). Известно, что при включении катушки на

постоянное напряжение, уравнение для электрической цепи может быть записано в виде:

$$u = r \cdot i + L_s \cdot \frac{di}{dt} + w \cdot \frac{d\Phi_\Psi}{dt}, \quad (3)$$

где  $u$  – напряжение, приложенное к катушке;  $i$  – ток катушки;  $L_s$  – индуктивность рассеяния катушки;  $w$  – число витков;  $\Phi_\Psi$  – поток, приведенный по потокоцеплению.

Преобразуем уравнение (3) к виду, который даст возможность совместного решения уравнений (2,3). Для этого необходимо преобразовать поток  $\Phi_\Psi$  следующим образом:

$$\Phi_\Psi = \frac{1}{w} \cdot \int_w \Phi \cdot dw = \frac{1}{w} \cdot \int_w \Phi \cdot \frac{w}{S} \cdot dS = \frac{1}{S} \cdot \int_S \Phi \cdot dS, \quad (4)$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения катушки.

Дальнейшее преобразование заключается в следующем:

$$\Phi = \oint_l \vec{A} \cdot d\vec{l}, \quad (5)$$

где  $\Phi$  – магнитный поток, пронизывающий замкнутый контур  $\vec{l}$ . Подставив (5) в (4) с учетом (3), получим систему уравнений расчета переходных процессов в электромагните:

$$\text{rot} \left( \frac{1}{\mu} \cdot \text{rot} \vec{A} \right) + \sigma \cdot \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \vec{J}_{st} \quad (6)$$

$$u = r \cdot i + L_s \cdot \frac{di}{dt} + \frac{w}{S} \cdot \int_S \oint_l \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \cdot d\vec{l} \cdot dS$$

Или с учетом осесимметричности задачи и условия равномерности распределения тока по площади катушки:

$$\text{rot} \left( \frac{1}{\mu} \cdot \text{rot} A_\varphi \right) + \sigma \cdot \frac{\partial A_\varphi}{\partial t} = \frac{i}{S \cdot k_z} \cdot w \quad (7)$$

$$u = r \cdot i + L_s \cdot \frac{di}{dt} + \frac{w}{S} \cdot \int_V \frac{\partial A_\varphi}{\partial t} \cdot dV$$

где  $V$  – объем катушки;  $k_z$  – коэффициент заполнения катушки медью.

Система (7) имеет нулевые начальные условия.

При этом надо отметить, что:

$$A_\varphi = A_\varphi(t, r, z), i = i(t). \quad (8)$$

Решение системы (7) с учетом (8) является достаточно сложной задачей для решения которой необходимо решить двухмерное нестационарное уравнение для векторного магнитного потенциала в нелинейной среде совместно с уравнением тока сети.

Для решения данной задачи можно воспользоваться программой Femlab, в которой создадим 2 геометрии: 1) двухмерное осесимметричное пространство для решения задачи о распределении нестационарного векторного потенциала - G1; 2) одномерное пространство единичной длины для решения нестационарного уравнения электрической цепи – G2. В G1 задаются начальные и граничные условия, а так же свойства областей. В G2 на границах одномерного пространства задаются условия Неймана, а так же коэффициенты при токе, его производной и напряже-

ние сети. Переменная  $\frac{w}{S} \cdot \int_V \frac{\partial A_\varphi}{\partial t} \cdot dV$  из G1 в G2 пере-

дается через связанную интегральную переменную и со знаком минус суммируется с постоянным напряжением. Ток из G2 передается в G1 через общую область.

В качестве исходных данных для расчета принимались следующие значения:

Активное сопротивление катушки – 16 Ом;

Индуктивность рассеяния – 0,0034 Гн;

Напряжение сети – 24 В;

Число витков – 300.

В качестве материала магнитопровода выбрана ст.10. Зависимость динамической магнитной проницаемости от модуля магнитной индукции показаны на рис. 2.

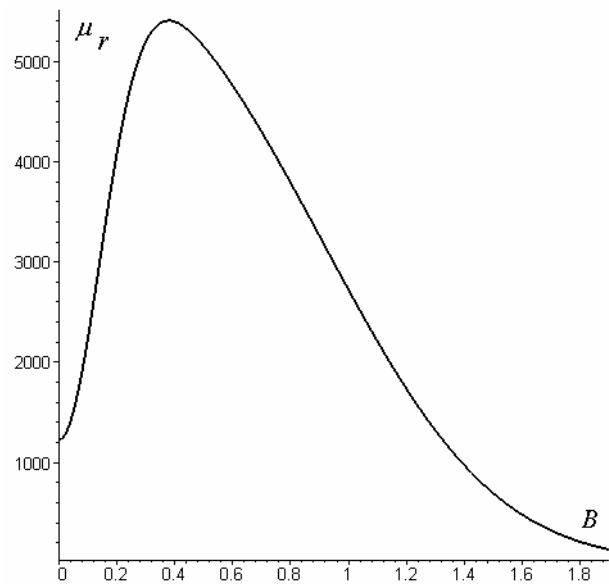


Рис. 2. Зависимость относительной магнитной проницаемости от магнитной индукции

В результате расчетов была получена кривая нарастания тока катушки в зависимости от времени, показанная на рис. 3.

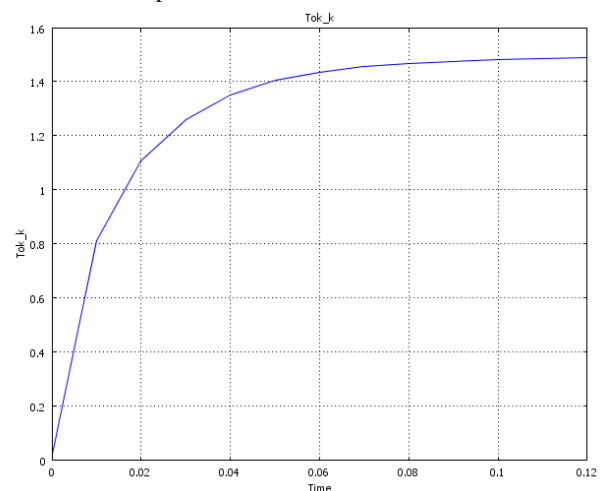


Рис. 3. Зависимость нарастания тока в катушке электромагнита

Время, за которое значение тока достигает величины 0,98 от установившегося значения, составляет 0,1 с, что и можно считать временем окончания переходного процесса в электрической цепи. Общее расчетное время составляло 7 с, что может считаться временем окончания переходного процесса в магнитной цепи. На рис. 4, 5, 6 показаны распределения магнитной индукции по высоте магнита: 1) на уровне нижнего края катушки; 2) по средней линии; 3) на уровне верхнего края катушки.

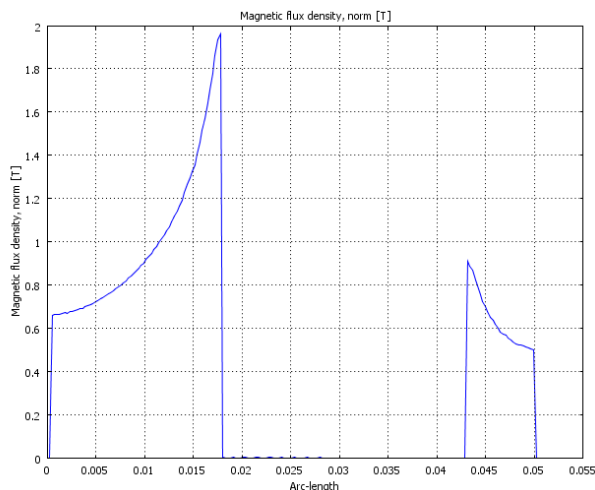


Рис. 5. Распределение индукции в основании катушки

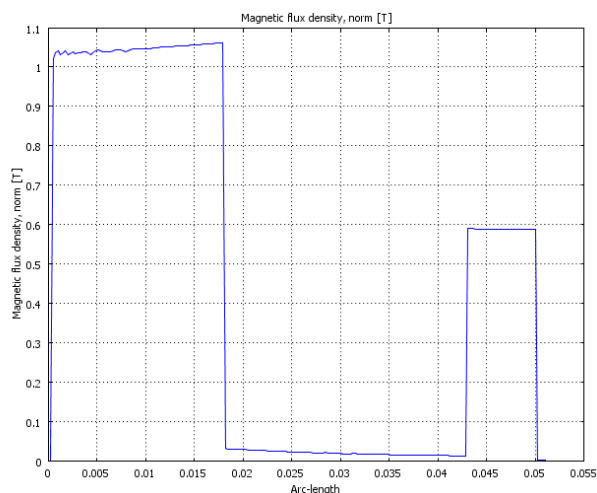


Рис. 6. Распределение индукции на уровне середины катушки

На рис. 8 показано изменение магнитной индукции в зависимости от времени через 0,1 с на уровне центральной части катушки. Общее время – 0,4 с.

На основании графика (рис. 8) можно утверждать, что при величине воздушного зазора в 0,85 мм, постоянная времени магнитных процессов примерно в четыре раза больше электрической постоянной времени.

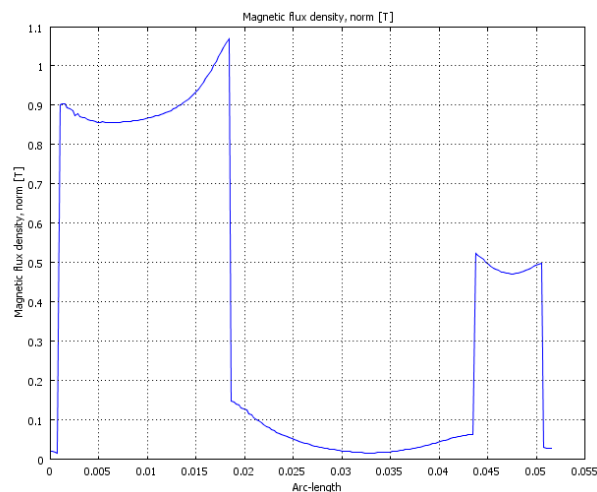


Рис. 7. Распределение индукции на уровне верхнего края катушки

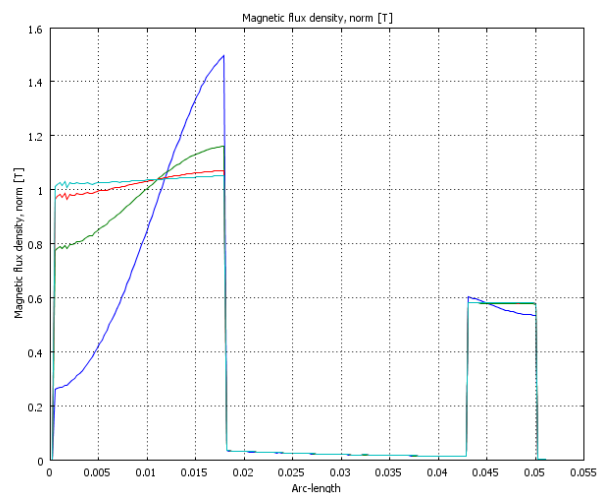


Рис. 8. Изменение магнитной индукции с шагом 0,1 с

При меньших воздушных зазорах это различие, очевидно, будет возрастать. На рис. 9 показаны значения магнитной индукции в интервале времени (0-0,1)с с шагом 0,01 с.

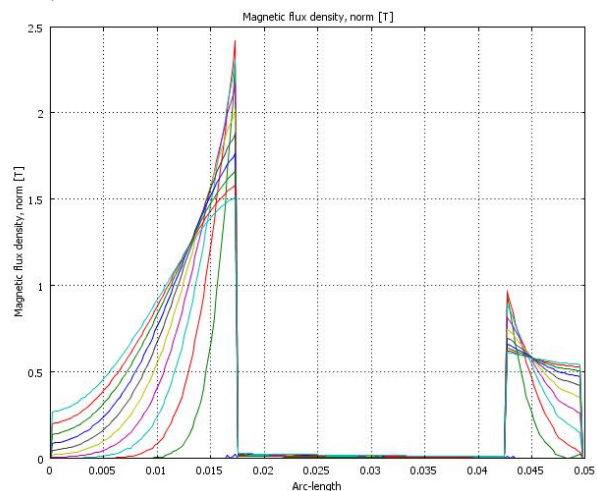


Рис. 9. Изменение индукции в центральной части магнитопровода в диапазоне 0-0,1 с

На рис. 10 показана временная зависимость электромагнитной силы в зазоре под центральным стержнем магнита.

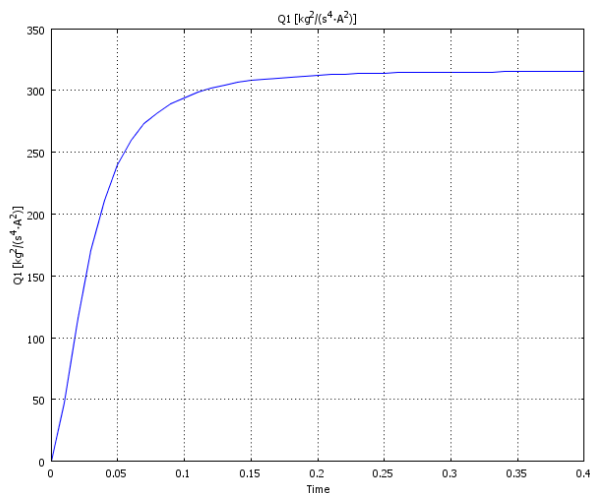


Рис. 10. Электромагнитная сила под центральным стержнем

На рис. 11 показано изменение плотности индукционного тока по радиусу магнита.

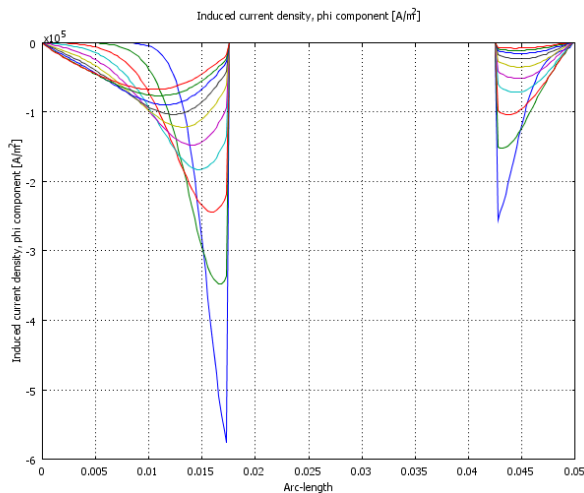


Рис. 11. Распределение плотности тока по радиусу магнита

Аналогично можно рассчитать значения в любой части магнита. Интерес представляет не только распределение плотности тока, но и значения самих токов и их временная зависимость. На рис. 12,13 показаны изменения наведенных токов в корпусе и якоре электромагнита.

Следовательно, используя данную программу, можно рассчитать все параметры электромагнитного механизма.

Так как целью расчета является определение быстроедействия электромагнита, то предварительно необходимо рассмотреть электрическую схему отключения цепи. Будем считать, что для ограничения перенапряжений, параллельно катушке включен диод (рис. 14).

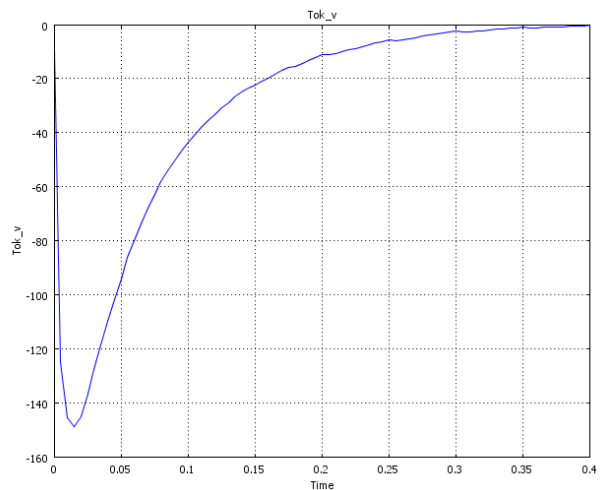


Рис. 12. Вихревые токи в корпусе электромагнита

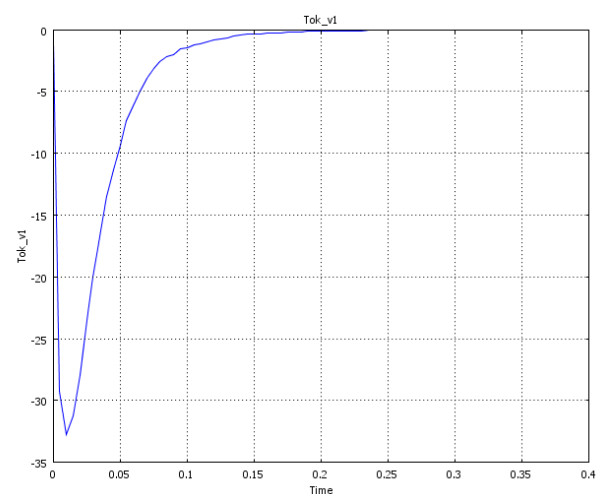


Рис. 13. Вихревые токи якоря

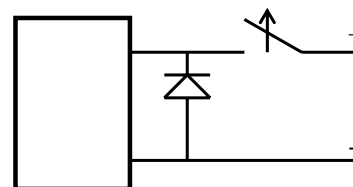


Рис. 14. Схема отключения катушки

В этом случае, можно не учитывать процессы, происходящие на контактах и не учитывать сопротивление диода.

Функциональные возможности программы Femlab позволяют задать напряжение в виде табличной зависимости от времени с последующей линейной (или иной) аппроксимацией. График такой функции показан на рис.15.

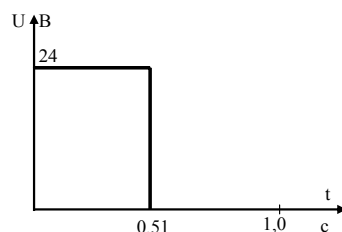


Рис. 15. Рабочий цикл по напряжению катушки электромагнита

Результаты расчета по программе показаны на последующих рисунках 16-19.

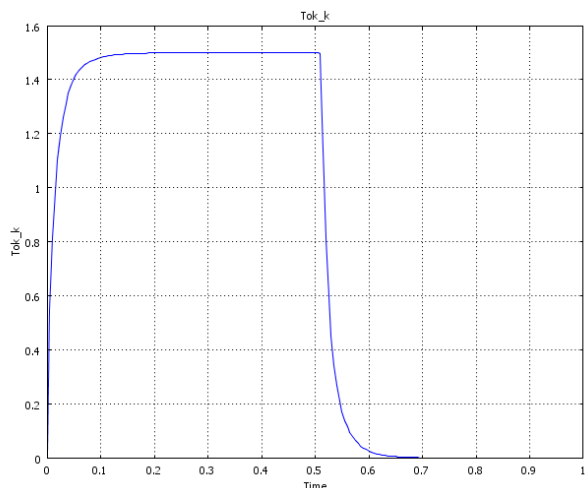


Рис. 16. Зависимость тока катушки от времени

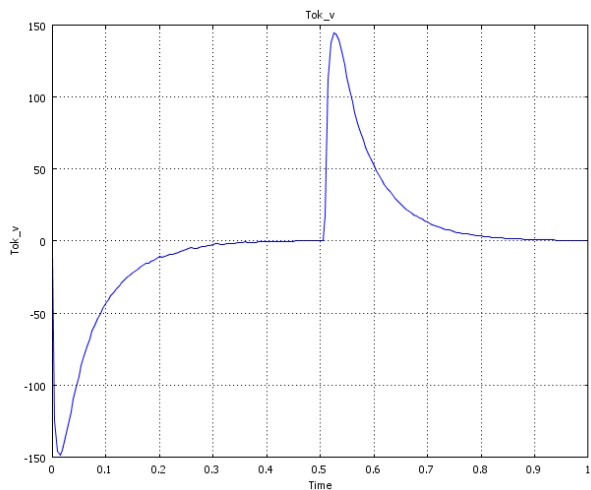


Рис. 17. Временная зависимость вихревого тока в корпусе электромагнита

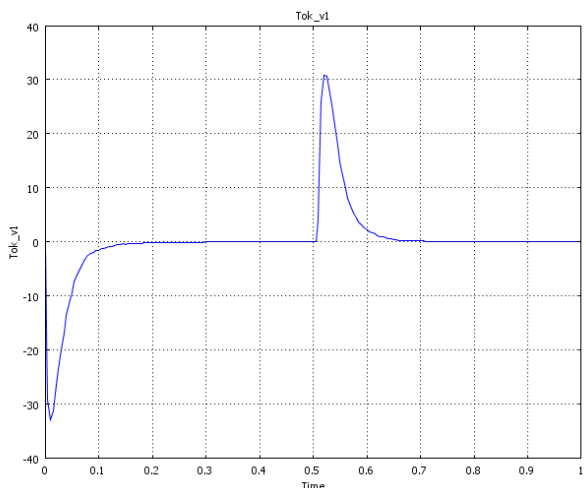


Рис. 18. Вихревые токи якоря

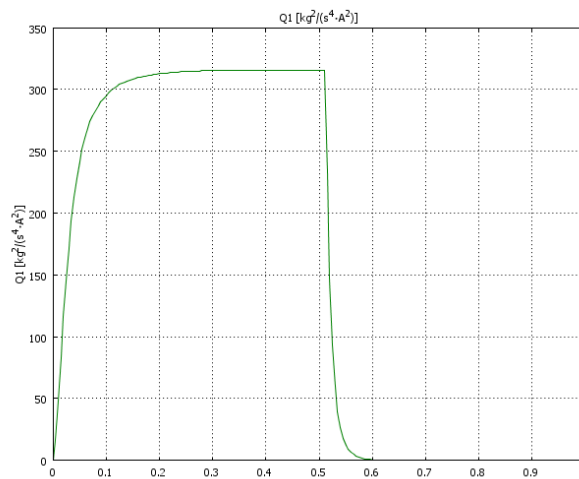


Рис. 18. Зависимость электромагнитной силы центральной части корпуса

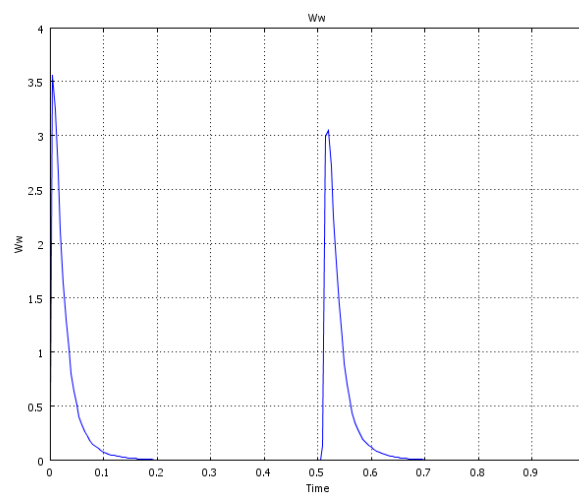


Рис. 19. Значения мгновенной объемной мощности, выделяемой в корпусе электромагнита

Таким образом, на основании проведенных расчетов можно заключить, что спроектированный электромагнит по условиям быстродействия вполне соответствует техническому заданию. Кроме того, использование программы Femlab позволяет рассчитать переходные процессы в электрических цепях, содержащие ферромагнитные элементы на основании дифференциальных уравнений электромагнитного поля, получив при этом всевозможные значения практически любых параметров электромагнита.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Клименко Б.В. Форсированные электромагнитные системы. - М.; Энергоатомиздат, 1989. - 160 с.
- [2] Нейман Л.Р., Калантаров П.Л. Теоретические основы электротехники, ч.3. Теория электромагнитного поля. - М.; Госэнергоиздат, 1949. - 343 с.

Поступила 08.04.2008