
СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

7. Frawley W. J. Knowledge discovery in databases: an overview / W. J. Frawley, G. Patetsky-Shapiro, C. J. Mathews. – Cambridge : AAAI/MIT Press, 1991.

8. Kasabov N. Evolving connectionists systems. The Knowledge Engineering Approach / N. Kasabov // Originally published in the Series: Perspectives in Neural Computing. – 2nd ed. – XXII. – 451 s.

УДК 621.375.132

МОДЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАЗВЕТВЛЕННОЙ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

Марченко Алексей Лукич, кандидат технических наук, «МАТИ» – Российский государственный технологический университет имени К.Э. Циолковского, 121552, Россия, Москва, Оршанская, 3, e-mail: marchenkoal@mail.ru.

Разветвленные магнитные цепи с постоянными магнитодвижущими силами и с воздушными зазорами в магнитопроводе являются нелинейными. При расчете магнитных потоков (магнитных индукций) в зазорах магнитные цепи заменяют эквивалентной электрической цепью, причем принимается, что магнитодвижущая сила аналогична электродвижущей силе, магнитное сопротивление участка магнитопровода – резистивному нелинейному сопротивлению с вольт-амперной характеристикой, аналогичной вебер-амперной характеристике соответствующего участка магнитопровода, магнитное сопротивление воздушного зазора – сопротивлению линейного резистора, магнитный поток – электрическому току. В результате получается нелинейная электрическая цепь, которую нужно рассчитывать графическим или каким-либо другим способом.

В статье рассмотрена программа для вычисления магнитных потоков в воздушных зазорах разветвленной магнитной цепи, используемая в вузовском учебном процессе при изучении электротехники. При расчете магнитных потоков использована аналитическая аппроксимация кривых намагничивания четырех марок стали, а при решении системы нелинейных уравнений – численный метод Ньютона. Моделирование магнитной цепи выполнено в среде Borland C++ Builder 6.0.

Ключевые слова: модель магнитной цепи, магнитные потоки в воздушных зазорах, численный метод Ньютона, матрица Якоби.

MODEL ANALYSIS OF MAGNETIC CIRCUIT

Marchenko Alexey L., Cand. in Technics, Moscow State Aviation Technological University, 3 Orshanskaya str., Moscow, 121552, Russia, e-mail: marchenkoal@mail.ru.

The branched magnetic circuits with constant magnetic-driving forces and with air gaps wide in fram are nonlinear. At calculation of magnetic flux (magnetic inductions) in branched magnetic circuits are replaced with an equivalent electric circuit, and it is accepted that magnetic-driving force is similar to an electromotive power, magnetic resistance of a site fram – to resistive nonlinear resistance similar to volt-ampere the characteristic similar veber-ampere to the characteristic of the corresponding site fram, magnetic resistance of an air gap wide – to resistance of the linear resistor, a magnetic flux – to an electric current. The nonlinear electric circuit which needs to be calculated graphic or otherwise as a result turns out.

In the article the program for calculation of magnetic flux in air gaps wide of the branched magnetic circuit used in high school teaching while studying electrical engineering is considered.

When calculating magnetic flux the analytical approximation of magnetization curves of four grades is used, and in solving systems of nonlinear equations numerical method of Newton is used. Modeling of a magnetic circuit is executed in the environment of Borland C++ Builder 6.0.

Key words: model branched magnetic circuit, magnetic flux in air gaps, numerical method of Newton, Jacobi matrix.

ВЕДЕНИЕ

При изучении разветвленных магнитных цепей с постоянными магнитодвижущими силами F_k возникает задача их анализа с целью определения магнитных потоков Φ_k (или магнитных индукций B_k) в воздушных зазорах. Магнитные цепи являются нелинейными, и все расчеты устройств с ферромагнетиками ведут с определенной степенью точности [1]. Статья посвящена разработке и использованию в учебном процессе вузов упрощенной компьютерной модели разветвленной магнитной цепи, позволяющей студентам изучать влияние различных параметров цепи на характер изменения магнитных индукций в воздушных зазорах магнитопровода.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦЕПИ

Моделирование магнитной цепи выполнено в среде Borland C++ Builder 6.0. Обобщенная магнитная цепь и ее эквивалентная схема замещения представлены в верхней части рисунка 1, на которой обозначены:

$l_{1м}, l_{2м}, l_{3м}$ – средние длины магнитных силовых линий участков цепи, м;
 S_1, S_2, S_3 – сечения участков $l_{1м}, l_{2м}, l_{3м}$ магнитопровода, м²;
 $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ – длины воздушных зазоров, м;
 $w_1, w_2, w_3, w_{41}, w_{42}, w_{43}$ – числа витков обмоток катушек,
 $I_1, I_2, I_3, I_{41}, I_{42}, I_{43}$ – постоянные токи обмоток катушек, А;
 $R_{1м}, R_{2м}, R_{3м}, R_{1\delta}, R_{2\delta}, R_{3\delta}$ – магнитные сопротивления участков магнитопровода и воздушных зазоров, 1/Гн.

Известно, что в разветвленной магнитной цепи формируется несколько магнитных потоков Φ_k , которые складываются или вычитаются на некоторых ее участках в зависимости от величины и направления токов I_k , точнее, МДС $F_k = w_k I_k$ обмоток катушек, расположенных на стержнях магнитопровода. При расчете магнитных потоков Φ_1, Φ_2 и Φ_3 магнитную цепь заменяют эквивалентной электрической схемой, и для нее составляют уравнения законов Кирхгофа, предварительно задав условно положительные направления магнитных потоков в отдельных ветвях схемы и направление обхода ее контуров (см. рис. 1):

$$\begin{aligned}\Phi_1 - \Phi_2 + \Phi_3 &= 0; \\ R_{1м}\Phi_1 + R_{1\delta}\Phi_1 + R_{2м}\Phi_2 + R_{2\delta}\Phi_2 &= F_1 - F_2 + F_{41} - F_{42}; \\ R_{1м}\Phi_1 + R_{1\delta}\Phi_1 - R_{3м}\Phi_3 - R_{3\delta}\Phi_3 &= F_1 - F_3 + F_{41} - F_{43}.\end{aligned}\quad (1)$$

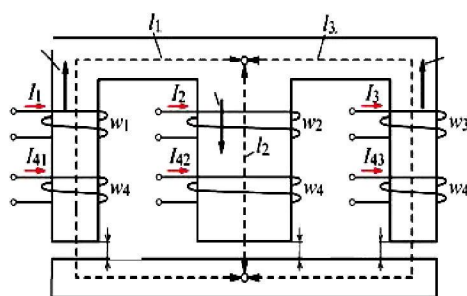
Решается система (1) нелинейных уравнений одним из численных методов после кусочно-линейной или аналитической аппроксимации кривых намагничивания $B_k(H_k)$, где B_k и H_k – магнитная индукция (Тл) и напряженность магнитного поля (А/м) в k -м стержне магнитопровода. Алгоритм вычисления магнитных потоков предусматривает изготовление стержней из листов одной марки стали толщиной 0,28...0,6 мм: из холоднокатаной листовой электротехнической стали марки 3411 или 1512, горячекатаной листовой марки 1212 и из горячекатаной литой стали марки 10895, кривые намагничивания которых, построенные по данным [3], приведены на рисунке 2а.

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Расчет разветвленной магнитной цепи постоянного тока



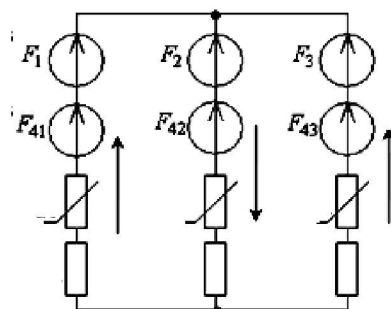
Расчет магнитных потоков в разветвленной магнитной цепи с воздушными зазорами



Выберите марку стали

l_1	l_2	l_3	
S_1			
I	I_2	I_3	I_4
A	A	A	A

при



Задание 1. Рассчитать магнитные потоки в цепи:

- 1.1. Ввести номер варианта задания N .
- 1.2. Выбрать марку стали стержней магнитопровода.

1.3. Рассчитать магнитные потоки Φ_1 , Φ_2 и Φ_3 .

Задание 2. Рассчитать магнитную индукцию в заданном зазоре δ_k и построить график $B_\delta(\delta_k)$, где k – номер зазора ($k = 1$ для $N = 1 \dots 10$, $k = 2$ для $N = 11 \dots 20$, $k = 3$ для $N = 21 \dots 30$):

2.1. Установить длину зазора $\delta_k = 0,001$ м.

2.2. Рассчитать магнитные потоки Φ_1 , Φ_2 и Φ_3 .

Изменяя длину зазора в пределах $(0,5 \dots 2,0)\delta_k$, повторить 6...8 раз п. 2.2.

2.4. Построить график $B_\delta(\delta_k)$.

Рис. 1. Стартовый экран программы MagnC

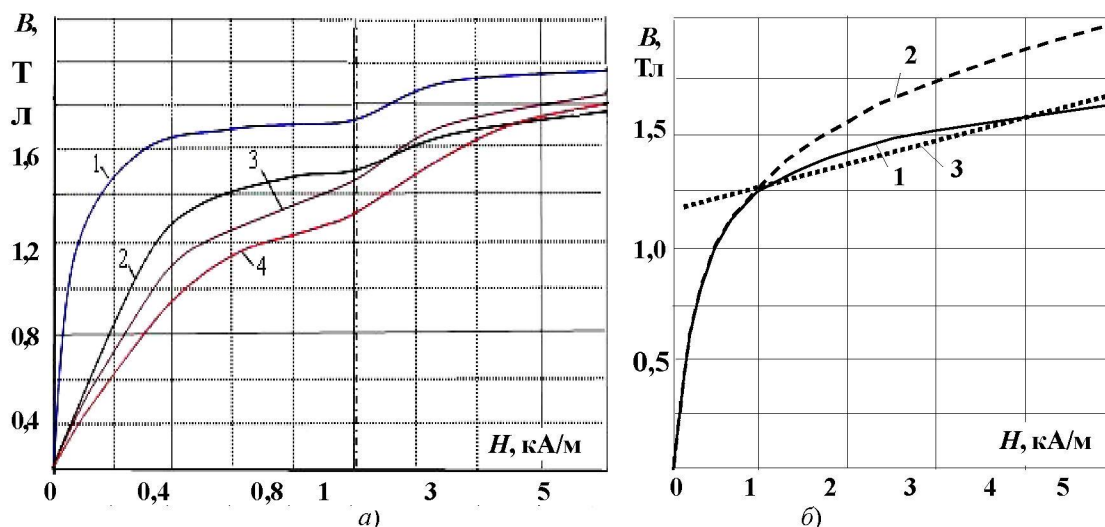


Рис. 2. Кривые намагничивания марок сталей: 1 – 3411; 2 – 1512; 3 – 1212; 4 – 10895 (а), кривая намагничивания (1) стали 1212 и аппроксимирующие ее функции 2 и 3 (б)

При моделировании обобщенной магнитной цепи использована аппроксимация кривых $B_k(H_k)$ гиперболическим синусом в виде $H = \alpha \text{sh}(\beta B)$ и прямой линией за коленом кривой намагничивания $H = (B - b)/m$, где α , β , b и m – коэффициенты, подбираемые для каждой марки стали методом последовательного приближения.

Так, кривая 1 намагничивания электротехнической стали 1212 (рис. 2б) аппроксимирована кривой 2, описываемой функцией $H = 53,42 \text{sh}(2,82B)$ на интервале $H \in [0; 1000 \text{ А/м}]$, и прямой 3, описываемой уравнением $H = (B - 1,21875)/6,625 \cdot 10^{-5}$, которая продолжает аппроксимацию кривой $B(H)$ при $H > 1000 \text{ А/м}$. Проверка точности аппроксимации показала, что отклонение аппроксимирующих кривых от кривой $B(H)$ не превышает 8 %. Аналогичной процедуре аппроксимации подверглись кривые намагничивания остальных трех марок сталей.

Преобразовав систему (1) к двум уравнениям посредством замены магнитного потока среднего стержня Φ_2 суммой магнитных потоков $\Phi_1 + \Phi_3$ и выполнив преобразования оставшихся двух уравнений посредством замены выражений $R_{km}\Phi_k$ и $R_{k\delta}\Phi_k$ соответственно магнитными напряжениями $H_k l_k$ на ферромагнитных участках схемы магнитной цепи и напряжениями $H_{k\delta} \delta_k$ на зазорах, а МДС F_k – произведениями $w_k I_k$, получим:

$$\begin{aligned} H_1 l_1 + H_{1\delta} \delta_1 + (H_1 + H_3) l_2 + H_{2\delta} \delta_2 &= w_1 I_1 + w_{41} I_{41} - w_2 I_2 - w_{42} I_{42}; \\ H_1 l_1 + H_{1\delta} \delta_1 - H_3 l_3 - H_{3\delta} \delta_3 &= w_1 I_1 + w_{41} I_{41} - w_3 I_3 - w_{43} I_{43}. \end{aligned}$$

При напряженности магнитного поля в стержне $H = \alpha \text{sh}(\beta B)$ и в воздушном зазоре $H_\delta = B_\delta / \mu_0 = 8 \cdot 10^5 B_\delta = 8 \cdot 10^5 \Phi_\delta / (1,1 S_M)$, где $B = \Phi / S_M$; $B_\delta = \Phi / (1,1 S_M)$; 1,1 – коэффициент, учитывающий потоки рассеяния (выпучивание магнитных потоков в зазорах); $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ – магнитная проницаемость пустоты, имеем:

$$\begin{aligned} l_1 \alpha \text{sh} \frac{\beta \Phi_1}{S_1} + l_2 \alpha \text{sh} \frac{\beta \Phi_1 + \beta \Phi_3}{S_2} + \frac{8 \cdot 10^5 \Phi_1 \delta_1}{1,1 S_1} + \frac{8 \cdot 10^5 \delta_2 (\Phi_1 + \Phi_3)}{1,1 S_2} &= \\ = w_1 I_1 - w_2 I_2 + w_{41} I_{41} - w_{42} I_{42}; & \\ l_1 \alpha \text{sh} \frac{\beta \Phi_1}{S_1} - l_3 \alpha \text{sh} \frac{\beta \Phi_3}{S_3} + \frac{8 \cdot 10^5 \delta_1 \Phi_1}{1,1 S_1} - \frac{8 \cdot 10^5 \delta_3 \Phi_3}{1,1 S_3} &= \\ = w_1 I_1 - w_3 I_3 + w_{41} I_{41} - w_{43} I_{43}. & \end{aligned} \quad (2)$$

Решение системы (2) выполняется посредством численного метода Ньютона, в котором на каждом шаге итерационного процесса решается матрица, обратная матрице Якоби. Для системы, состоящей из двух уравнений: $f_1(x, y) = 0$; $f_2(x, y) = 0$, обратная матрица вычисляется аналитическим методом:

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x} & \frac{\partial f_1}{\partial y} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x} & \frac{\partial f_2}{\partial y} \end{bmatrix}, \text{ обратная матрица } [J]^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{a_{11}}{d} & \frac{a_{12}}{d} \\ \frac{a_{21}}{d} & \frac{a_{22}}{d} \end{bmatrix},$$

где $a_{11} = \frac{\partial f_2}{\partial y}$; $a_{12} = -\frac{\partial f_1}{\partial y}$; $a_{21} = -\frac{\partial f_2}{\partial x}$; $a_{22} = \frac{\partial f_1}{\partial x}$; $d = \frac{\partial f_1}{\partial x} \frac{\partial f_2}{\partial y} - \frac{\partial f_1}{\partial y} \frac{\partial f_2}{\partial x}$,

а итерационные формулы имеют вид:

$$x_{k+1} = x_k - \frac{1}{d(k)} \left[a_{11}^{(k)} f_1(x_k, y_k) + a_{12}^{(k)} f_2(x_k, y_k) \right]; y_{k+1} = y_k - \frac{1}{d(k)} \left[a_{21}^{(k)} f_1(x_k, y_k) + a_{22}^{(k)} f_2(x_k, y_k) \right].$$

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Необходимые значения производных $\partial f_i/\partial x$ и $\partial f_i/\partial y$ матрицы Якоби вычисляются с помощью формул численного дифференцирования. Верхний индекс k означает, что соответствующая величина вычисляется в точке $(x^{(k)}, y^{(k)})$. Процесс итерации останавливается при достижении заданной точности ε при выполнении неравенства $|x_i^{(k)} - x_i^{(k-1)}| \leq \varepsilon$. Магнитный поток Φ_2 определяется из первого уравнения системы (1).

Программа [2] запускается непосредственно с компакт-диска, поддерживает как случайную генерацию вариантов задания, так и ввод параметров элементов магнитной цепи «вручную». После запуска программы и ввода номера варианта задания в ячейки таблицы выводятся значения параметров элементов схемы цепи, сгенерированные случайным образом из заданного ряда чисел, а в правом поле интерфейса автоматически строится расчетная схема замещения цепи (рис. 3).

В программе предусмотрено, чтобы в каждом варианте магнитной цепи, кроме трех основных обмоток с числами витков w_1 , w_2 и w_3 , осталась одна из трех обмоток с числами витков w_{41} , w_{42} , w_{43} . Для изменения направления тока в обмотке нужно перед его значением в ячейке таблицы поставить знак минуса.

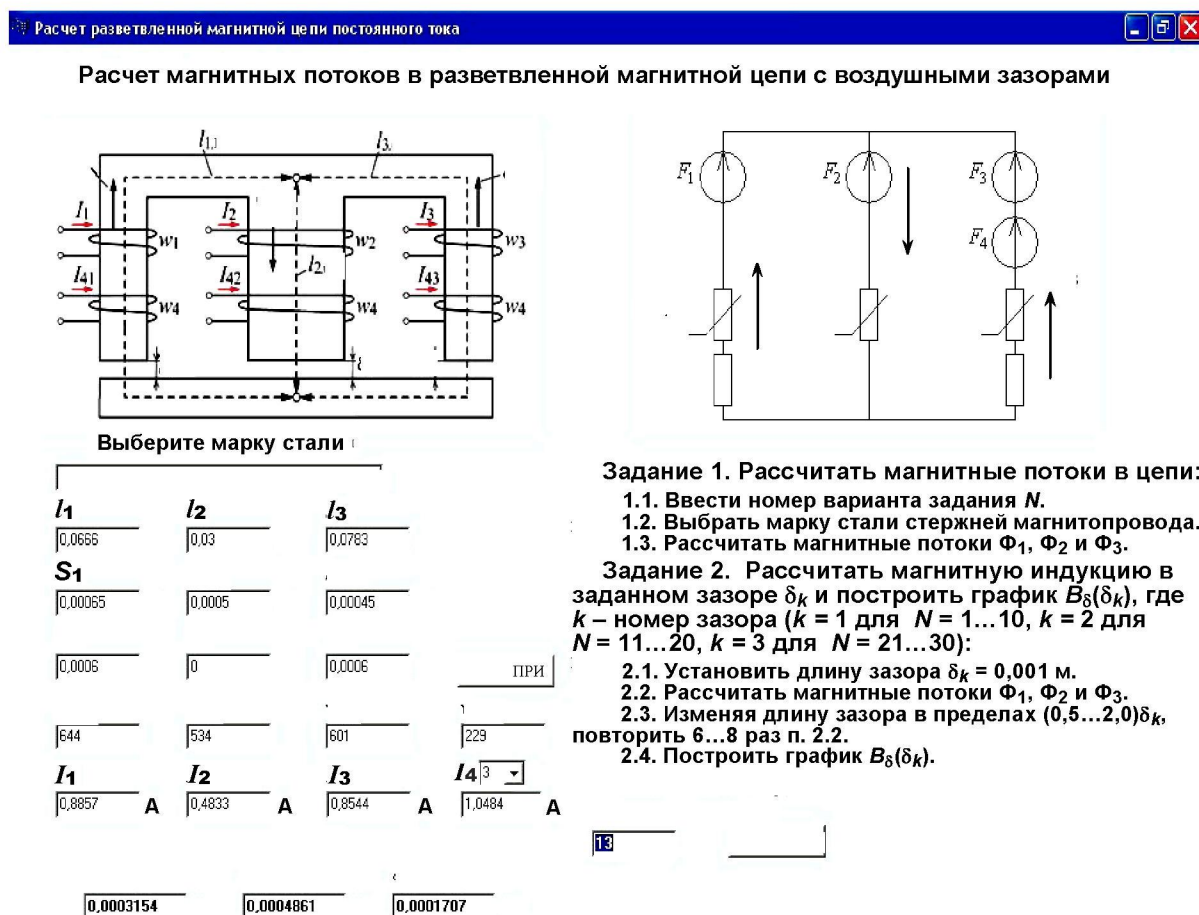


Рис. 3. Страница интерфейса после ввода номера варианта задания, выбора марки стали стержней магнитопровода и расчета магнитных потоков

Выбрав марку стали стержней магнитопровода цепи и изменив (согласно заданию) значения ее параметров, после щелчков мышью на кнопках «Принять» и «Расчет», вычисляются по программе и выводятся значения магнитных потоков Φ_1 , Φ_2 и Φ_3 (см. рис. 3, внизу). Изменяя длину заданного в варианте воздушного зазора δ_k и выполнив по программе 6...8 расчетов магнитных потоков цепи и «вручную» магнитной индукции в зазоре, строится график $B_s(\delta_k)$. Также, согласно вариантам заданий, студенты исследуют влияние вариаций других геометрических или электрических параметров магнитной цепи на характер изменения магнитных потоков или магнитных индукций в воздушных зазорах магнитопровода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренный электронный ресурс представляет собой эффективный инструмент реализации исследовательского метода в обучении в плане расширения проблематики проведения студентами исследований. Открываемые компьютерным моделированием и вычислительным экспериментом возможности постановки реальных задач без оглядки на сложность математического аппарата описания процессов, происходящих в электротехнических устройствах, возможность оперативно вносить изменения в саму компьютерную модель способствуют активизации исследовательской деятельности студентов и придают образовательному процессу новое качество.

Результаты работы с компьютерной моделью разветвленной магнитной цепи свидетельствуют о том, что внедрение подобных программных продуктов в учебный процесс позволяет существенно интенсифицировать деятельность преподавателей и студентов, повысить мотивацию студентов к изучению электротехники, развить способность к рефлексивному восприятию и осмыслению материала.

Список литературы

1. Беневоленский С. Б. Основы электротехники : учеб. пос. для втузов (+CD) / С. Б. Беневоленский, А. Л. Марченко. – М. : Физматлит, 2011. – 568 с.
2. Марков А. В. Расчет магнитной цепи MagnC / А. В. Марков, А. Л. Марченко // Свид. о регистр. в ОФАП № 5344 от 28.10.2005 г. Номер гос. регистр. в ВНИИЦ Рособразования № 50200501555 от 31.10.2005 г.
3. Электротехнический справочник : в 4 т. – 10-е изд., стереотип. / под ред. В. Г. Герасимова, П. П. Грудинского, Л. А. Жукова и др. – М. : Изд. дом МЭИ, 2009. – Т. 1.

References

1. Benevolenskii S. B. Osnovy elektrotehniki : ucheb. pos. dlya vtuzov (+CD) / S. B. Benevolenskii, A. L. Marchenko. – M. : Fizmatlit, 2011. – 568 s.
2. Markov A. V. Raschet magnitnoi cepi MagnC / A. V. Markov, A. L. Marchenko // Svid. o registr. v OFAP №5344 ot 28.10.2005 g. Nomer gos. registr. v VNTIC Rosobrazovaniya № 50200501555 ot 31.10.2005 g.
3. Elektrotehnicheskii spravochnik : v 4 t. – 10-e izd., stereotip. / pod red. V. G. Gerasimova, P. P. Grudinskogo, L. A. Zhukova i dr. – M. : Izd. dom MEI, 2009. – T. 1.