

КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

Тема: Исследование процесса перемагничивания ферромагнитного материала.

Постановка задачи

Сердечник из ферромагнитного материала подвергается воздействию магнитного поля, содержащего два компонента:

- постоянную составляющую,
- гармоническую составляющую.

Необходимо в среде MATLAB разработать программу анализа отклика такого сердечника при различных уровнях воздействующих компонентов.

Краткие теоретические сведения

Характерной особенностью ферромагнитного материала является нелинейный характер зависимости индукции B от напряженности магнитного поля H . Для аппроксимации основной кривой намагничивания $B(H)$ могут быть использованы как кусочно-линейные, так и гладкие зависимости.

На рис. 1 изображены наиболее распространенные варианты кусочно-линейных зависимостей.

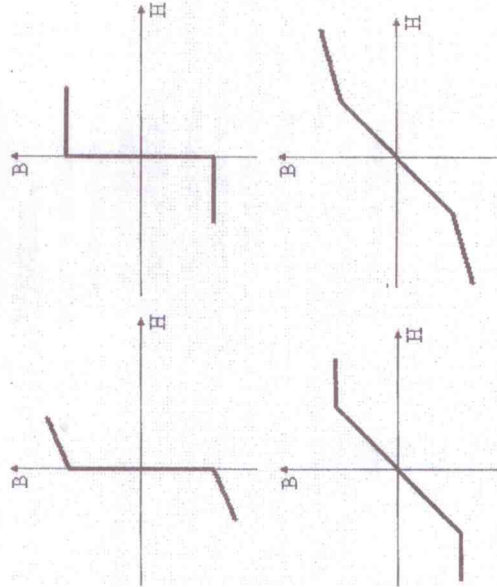


Рисунок 1. Варианты кусочно-линейных зависимостей для аппроксимации основной кривой намагничивания ферромагнитного материала

В качестве гладких зависимостей наиболее часто используются следующие функции

$$B = \alpha \operatorname{arctg}(\beta H)$$

$$B = \alpha \operatorname{th}(\beta H)$$

$$B = \alpha \sqrt{\ln(\beta H + 1)}$$

$$H = \alpha B + \beta B^3$$

$$H = \alpha(e^{\beta B} - 1)$$

$$H = \frac{\alpha B}{1 - \beta B}$$

где a , b – константы, числовые значения которых зависят от типа и марки ферромагнитного материала. Графические изображения этих функций приведены в таблице 1.

Для аналитического описания основной кривой намагничивания ферромагнитного материала могут быть использованы различные аналитические функции. При этом используются зависимости вида $B(H)$ и виде $H(B)$.

Сведения о функциях, качественно соответствующих кривой намагничивания и нашедших практическое применение, приведены в таблице 1.

Как следует из таблицы, каждая функция имеет свои особенности, которые следует учитывать при решении вопроса об аппроксимации. Половина из приведенных функций $B = \alpha \operatorname{arctg}(\beta H)$, $B = \alpha \operatorname{th}(\beta H)$ и $H = \alpha B + \beta B^3$ способна работать в области как положительных, так и отрицательных значений напряженности и индукции. Другая половина $B = \alpha \sqrt{\ln(\beta H + 1)}$, $H = \alpha(e^{\beta B} - 1)$, $H = \alpha B/(1 - \beta B)$ может быть использована лишь для аппроксимации элементов, работающих при одной полярности напряженности и индукции.

Функции $B = \alpha \operatorname{arctg}(\beta H)$, $B = \alpha \operatorname{th}(\beta H)$ и $H = \alpha B/(1 - \beta B)$ способны моделировать процесс насыщения, функции же $H = \alpha B + \beta B^3$, $B = \alpha \sqrt{\ln(\beta H + 1)}$ и $H = \alpha(e^{\beta B} - 1)$ таким свойством не обладают.

Функция $H = \alpha B + \beta B^3$ более удобна для общего анализа сложных процессов, поскольку допускает подстановку выражения для индукции в виде степенного или тригонометрического ряда. Использование такого приема для другие функций приводит к сложным трансцендентным уравнениям.

Числовые значения параметров аппроксимации α и β определяются из дополнительных условий. Например, для функции $B = \alpha \operatorname{arctg}(\beta H)$ параметр α может быть установлен, исходя из условия насыщения

Таблица 1

| Функция | График |
|--|--------|
| $B = \alpha \operatorname{arctg}(\beta H)$ | |
| $B = \alpha \operatorname{th}(\beta H)$ | |
| $B = \alpha \sqrt{\ln(\beta H + 1)}$ | |
| $H = \alpha B + \beta B^3$ | |
| $H = \alpha(e^{\beta B} - 1)$ | |
| $H = \frac{\alpha B}{1 - \beta B}$ | |

$$B|_{H \rightarrow \infty} = B_S,$$

эквивалентного соотношению

$$B_S = \alpha \frac{\pi}{2}.$$

В соответствии с этим условием получим аппроксимирующую функцию

$$B = \frac{2B_S}{\pi} \operatorname{arctg}(\beta H).$$

Параметр β в ней может быть определен из дополнительных условий. Например, если требуется, чтобы кривая намагничивания проходила через конкретную точку с координатами (H_1, B_1) , то таким условием будет требование

$$B_1 = \frac{2B_S}{\pi} \operatorname{arctg}(\beta H_1).$$

Из него следует

$$\beta = \frac{1}{H_1} \operatorname{tg} \left(\frac{\pi B_1}{2B_S} \right).$$

Если же требуется, чтобы основная кривая намагничивания проходила по возможности ближе к некоторой совокупности из n точек с координатами $(H_1, B_1), (H_2, B_2), \dots, (H_n, B_n)$, то можно воспользоваться методом наименьших квадратов и определить параметр исходя из условия

$$S = \sum_{i=1}^n \left[B_i - \frac{2B_S}{\pi} \operatorname{arctg}(\beta H_i) \right]^2 = \min.$$

Искомое значение коэффициента α является корнем уравнения

$$\frac{dS}{d\alpha} = 0.$$

Возможны два режима перемагничивания:

-режим источника тока, когда задают зависимость напряженности магнитного поля от времени $H(t)$ и, используя аналитическое выражение для

суммарной напряженности $H(t)$ и индукции соответствующей ей индукции $B(t)$.

Приведенную программу целесообразно использовать студентом для выполнения полученного задания. Рекомендуется выбрать вариант изменения варьируемого параметра, например, редактированием файла *peretag.m* с помощью запуска программы, либо формированием в программе цикла, осуществляющего варьирование параметров напряженности. Кроме того, следует продумать вариант вывода графиков, в частности,

- в виде отдельных рисунков,
- парного вывода диаграмм $H(t)$ и соответствующих им диаграмм $B(t)$.
- всех диаграмм одновременно в разные окна.

основной кривой намагничивания $B(H)$, строят зависимость индукции от времени $B(t)$;

- режим источника э.д.с., когда задают $V(t)$ и, используя аналитическое выражение $H(B)$, строят $H(t)$.

Задание

Для ферромагнитного материала с кривой намагничивания, описываемой функцией $B = \alpha \arcsin(\beta H)$, построить семейство зависимостей индукции от времени при перемещении в режиме источника тока промышленной сети частотой 50 Гц.

Варьируемые параметры (амплитуда гармонической составляющей напряженности магнитного поля H_m , его постоянная составляющая H_0 , либо и амплитуда H_m и постоянная составляющая одновременно H_0), диапазон изменения постоянной составляющей, а также ферромагнитный материал задаются таблицей, приведенной в приложении 1.

Значения коэффициентов аппроксимации для функции $B = \alpha \arcsin(\beta H)$

приведены в таблице 2

Таблица 2

| Материал | Коэффициенты аппроксимирующей функции | |
|----------------|---------------------------------------|-------|
| | a | b |
| Пермаллой 79НМ | 0,41 | 0,28 |
| Феррит 2000НМ | 0,43 | 0,017 |
| Сталь Э310 | 1,44 | 0,01 |

При выполнении контрольной работы необходимо:

- определить варьируемые параметры напряженности магнитного поля (в приложении 1 обозначены *var*)

- задать диапазон их изменения, учитывая определенную заданием область изменения ('-' - для отрицательных значений, '+' - для положительных значений, '+' - для отрицательных и положительных значений), выбрать несколько конкретных значений (не менее трех) из этого диапазона;

- для каждого из выбранных значений построить зависимость изменения индукции от времени;

- проанализировав полученные зависимости, сделать выводы о влиянии амплитуды гармонической H_m и постоянной составляющей H_0 напряженности на искажения индукции.

В качестве примера в приложении 2 приведен текст программы *peretag*, моделирующей процесс перемещения пермаллой 79НМ напряженностью магнитного поля, с амплитудой гармоники $H_m = 22$ и постоянной составляющей $H_0 = 10$. В приложении 3 приведены диаграммы изменения во времени

| Вариант | H_m | H_0 | Область изменения H_0 | Материал |
|---------|-------|-------|----------------------------|-----------|
| Вар.1 | var | var | + | пермаллой |
| Вар.2 | var | var | - | пермаллой |
| Вар.3 | var | var | ± | пермаллой |
| Вар.4 | var | const | + | пермаллой |
| Вар.5 | var | const | - | пермаллой |
| Вар.6 | var | const | ± | пермаллой |
| Вар.7 | const | var | + | пермаллой |
| Вар.8 | const | const | - | пермаллой |
| Вар.9 | const | const | ± | пермаллой |
| Вар.10 | var | var | + | феррит |
| Вар.11 | var | var | - | феррит |
| Вар.12 | var | var | ± | феррит |
| Вар.13 | var | const | + | феррит |
| Вар.14 | var | const | - | феррит |
| Вар.15 | var | const | ± | феррит |
| Вар.16 | const | var | + | феррит |
| Вар.17 | const | const | - | феррит |
| Вар.18 | const | const | ± | феррит |
| Вар.19 | var | var | + | сталь |
| Вар.20 | var | var | - | сталь |
| Вар.21 | var | var | ± | сталь |
| Вар.22 | var | const | + | сталь |
| Вар.23 | var | const | - | сталь |
| Вар.24 | var | const | ± | сталь |
| Вар.25 | const | var | + | сталь |
| Вар.26 | const | const | - | сталь |
| Вар.27 | const | const | ± | сталь |

```

% <<<< repmat >>>>
% Перематрицивание ферромагнетика синусоидальным полем
% в режиме источника тока (напряженностью поля)
% при аппроксимации ОКН функцией  $V = a \cdot \arctg(b \cdot H)$ 
a=.41; % аппроксимирующие коэффициенты
b=.28; %
Hm=22; % амплитуда напряженности
H0=10; % постоянная составляющая
f=50; % частота
ts=1/f; % период
ki=100; % количество интервалов в периоде
dt=ts/ki; % длительность одного интервала
T=0:dt:ts; % вектор времени
H=H0+Hm*sin(2*pi*f*T); % вектор напряженности
B=a*atan(b*H); % вектор индукции
subplot(2,1,1) % открытие первого окна
plot(T,H,'LineWidth',3) % построение зависимости H(t)
grid % формирование сетки
xlabel('t') % подпись оси абсцисс
ylabel('H') % подпись оси ординат
sh=num2str(Hm); % симв. представление амплитуды
s= strcat('Hm = ',sh); % формирование символьной надписи
title(s) % вывод надписи
subplot(2,1,2) % открытие второго окна
plot(T,B,'LineWidth',3) % построение зависимости B(t)
grid % формирование сетки
xlabel('t') % подпись оси абсцисс

```

Приложение 3

