



Минобрнауки России

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО  
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«РЫБИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АВИАЦИОННЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ П. А. СОЛОВЬЕВА»

ЗАОЧНАЯ ФОРМА ОБУЧЕНИЯ

# МАГНИТНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Методические указания  
к выполнению контрольной работы

*?* *Учебная работа*

РЫБИНСК  
2014

*Взглян В.В.*

## 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.

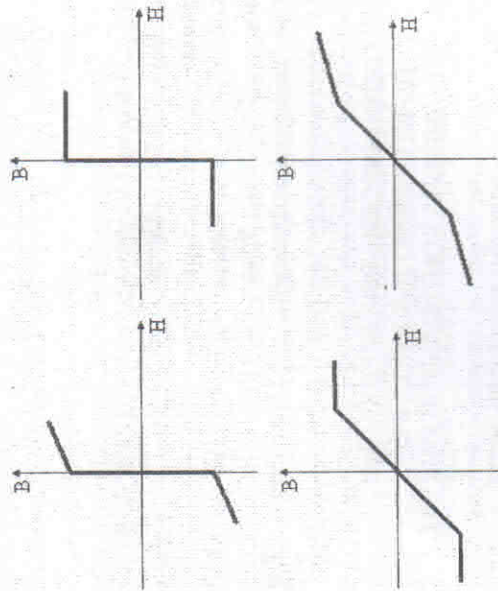


Рисунок 1. Варианты кусочно-линейных зависимостей для аппроксимации основной кривой намагничивания ферромагнитного материала

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 найденных практическое применение, приведены в таблице 1.

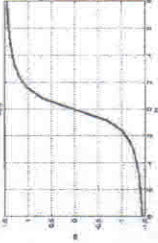

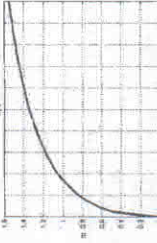

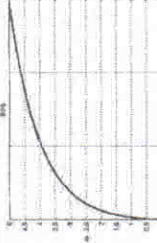
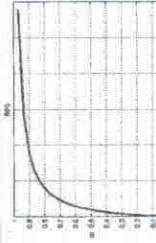
Как следует из таблицы, каждая функция имеет свои особенности, которые следует учитывать при решении вопроса об аппроксимации. Половина из приведенных функций  $B = \alpha \operatorname{arctg}(\beta H)$ ,  $B = \alpha \operatorname{th}(\beta H)$  и  $H = \alpha B + \beta B^3$  способна работать в области 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  $\alpha$  и  $\beta$  определяются из дополнительных условий. Например, для функции  $B = \alpha \operatorname{arctg}(\beta H)$  параметр  $\alpha$  может быть установлен, исходя из условия насыщения

Таблица 1

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

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

эквивалентного соотношению

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

В соответствии с этим условием получим аппроксимирующую функцию

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

Параметр  $\beta$  в ней может быть определен из дополнительных условий. Например, если требуется, чтобы кривая намагничивания проходила через конкретную точку с координатами  $(H_1, V_1)$ , то таким условием будет требова-

$$V_1 = \frac{2B_S}{\pi} \operatorname{arctg}(\beta H_1).$$

Из него следует

$$\beta = \frac{1}{H_1} \operatorname{tg} \left( \frac{\pi V_1}{2B_S} \right).$$

Если же требуется, чтобы основная кривая намагничивания проходила по возможности ближе к некоторой совокупности из  $n$  точек с координатами  $(H_1, V_1), (H_2, V_2), \dots, (H_n, V_n)$ , то можно воспользоваться методом наименьших квадратов и определить параметр исходя из условия

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

Искомое значение коэффициента  $\alpha$  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

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

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

#### Задание

Для ферромагнитного материала с кривой намагничивания, описываемой функцией  $B = \alpha \arctg(\beta H)$ , построить семейство зависимостей индукции от времени при перемагничивании 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 даются таблицей, приведенной в приложении 1.

Значения коэффициентов аппроксимации для функции  $B = \alpha \arctg(\beta H)$  приведены в таблице 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

Таблица 2

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 *Permag*, моделирующей процесс перемагничивания 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

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 *Permag.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.

## Приложение 1

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

## Приложение 2

```

%
% <<< regetag >>>
% Перемагничивание ферромагнетика синусоидальным полем
% в режиме источника тока (напряженностью поля)
% при аппроксимации ОКН функцией  $V = a * \arctg(b * H)$ 
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=streat('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

