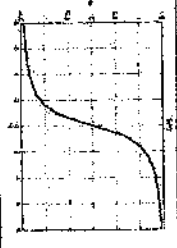
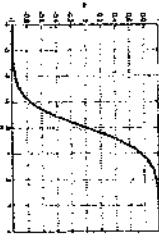
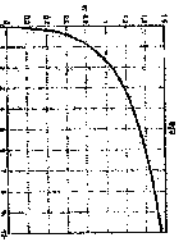
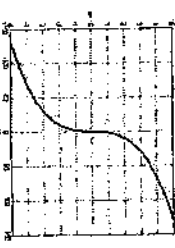

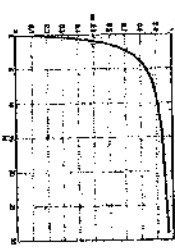


Таблица 1

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

$$V|_{H \rightarrow \infty} = V_s$$

эквивалентного соотношению

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

В соответствии с этим условием получим аппроксимирующую функцию

$$V = \frac{2V_s}{\pi} \operatorname{arctg}(BH).$$

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 требование

$$V_1 = \frac{2V_s}{\pi} \operatorname{arctg}(BH_1).$$

Из него следует

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

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

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

Искомое значение коэффициента  $\alpha$  является корнем уравнения

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

Возможны два режима намагничивания:

- режим источника тока, когда задана 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  $B = \alpha \operatorname{arctg}(\beta H)$ , построить семейство зависимостей индукции от времени при перематывании в режиме источника тока промышленной сети частотой 50 Гц.

Варьируемые параметры (амплитуда гармонической составляющей напряжения 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  $B = \alpha \operatorname{arctg}(\beta H)$  приведены в таблице 2

Таблица 2

Материал	Коэффициенты аппроксимирующей функции	
	a	b
Пермаллой 79НМ	0,41	0,28
Феррит 2000НМ	0,43	0,17
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;

- проанализировать 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 *relegim*, моделирующей процесс перематывания 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

В качестве гладких зависимостей наиболее часто используются следующие функции

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

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

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

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

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

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

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 вида  $H(B)$ .

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. Полюсана 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 полюсана  $B = \alpha \sqrt{\ln(\beta H + 1)}$ ,  $H = \alpha(e^{\beta B} - 1)$ ,  $H = \alpha B/(1 - \beta B)$  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  $a$  и  $\beta$  определяются из дополнительных условий. Например, для функции  $B = \alpha \operatorname{arctg}(\beta H)$  параметр  $\alpha$  может быть установлен, исходя из условия насыщения

## 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 МАТЛАВ 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.

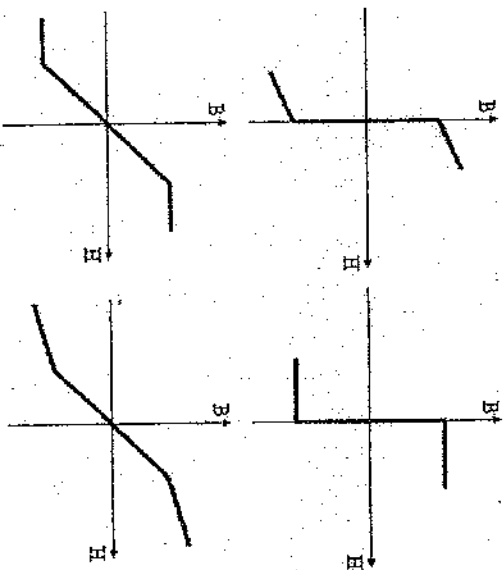


Рисунок 1. Варианты кусочно-линейных зависимостей для аппроксимации основной кривой намагничивания ферромагнитного материала

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

Приведенную программу целесообразно использовать студентам для выполнения полученного задания. Рекомендуется выбрать вариант изменения варьируемого параметра, например, релактированием файла *reemag.m* с помощью запускаем программы, либо форматыванием 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 разное 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

## 4. Трансформаторы

Эквивалентные схемы двухобмоточных трансформаторов. Анализ двухобмоточного трансформатора. Учет влияния потерь и полей рассеяния на процессы в трансформаторе. Трансформаторы согласования. Режим согласованной нагрузки. Частотные свойства трансформатора. Связь частотных свойств с параметрами трансформатора. Импульсные трансформаторы. Искажения формы импульса. Связь искажений с параметрами трансформатора. Расчет трансформаторов пиланки. Расчет трансформаторов согласования. Особенности расчета импульсного трансформатора.

## 5. Элементы и устройства магнитного ядра

Магнитные усилители. Магнитные модуляторы. Управляемые трансформаторные элементы. Стабилизаторы средних значений напряжений. Релейные схемы. Реле напряжения и тока. Реле температуры. Датчики напряжения. Функциональные преобразователи. Датчик мощности. Частотные демодуляторы. Пик-трансформаторы. Формирователи импульсов. Умножители частоты. Преобразователи числа фаз. Делители частоты. Счетчики импульсов. Элементы гальваномагнитного типа. Тонкопленочные элементы. Термосмагнитные и магнитно-оптические элементы.

## ЛИТЕРАТУРА

## Основные:

1. А.В.Манин, А.В.Юдин. Магнитные элементы электронных устройств: Учебное пособие / РГАТУ, Рыбинск, 2013. - 134с.

## Дополнительная:

1. Юдин В.В., Малков Б.Б. Исследование на ЭВМ моделей элементов РЭА: Учебное пособие / ЯПИ, Ярославль, 1989. - 80 с.  
2. Рыicina Т.А. Электрорадиоэлементы. - М.: Сов. Радио, 1976. -336с.

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ  
ПО ИЗУЧЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ  
И ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

Учебный материал дисциплины достаточно полно изложен в книгах списка основной литературы. Дополнительная литература рекомендуется для более глубокой проработки отдельных разделов программы и служит для лучшего освоения материала.

Изучение дисциплины рекомендуется проводить последовательно в порядке перечисления разделов рабочей программы.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Приложение 2

1. Основные положения теории ферромагнетизма. Домены. Намagnetивание ферромагнитного материала (смещение, вращение, парапроцесс). Основная кривая намагнетивания. Аппроксимированные функции и методы аппроксимации. Петли гистерезиса. Предельная петля. Симметричные и частные гистерезисные циклы. Аппроксимация петли гистерезиса. Особенности намагнетивания тонких ферромагнитных пленок. Скачки намагнетивности. Параметры ферромагнитных материалов. Остаточная индукция. Коэрцитивная сила. Магнитная проницаемость (абсолютная, относительная, начальная и дифференциальная магнитные проницаемости). Точка Кюри.

## 2. Процессы в цепях с ферромагнитными элементами

Закон полного тока. Закон электромагнитной индукции в интегральной форме. Среднее значение э.д.с. за период. Свойства цепи с ферромагнитным сердечником. Линейная индуктивность при потенциальном, экранициальном и гармоническом воздействиях. Нелинейная индуктивность. Цепь с ППТ. Многообмоточный линейный трансформатор. Обобщенная трансформаторная схема. Неправильный трансформатор. Установившийся процесс при гармоническом воздействии. Одновременное намагнетивание постоянным и переменным полями. Магнитный сердечник с немагнитным зазором. Феррорезонанс. Параметрический эффект в нелинейных индуктивных цепях. Коммутация магнитного потока. Подobie магнитных цепей.

## 3. Магнитные материалы и конструкции магнитопроводов

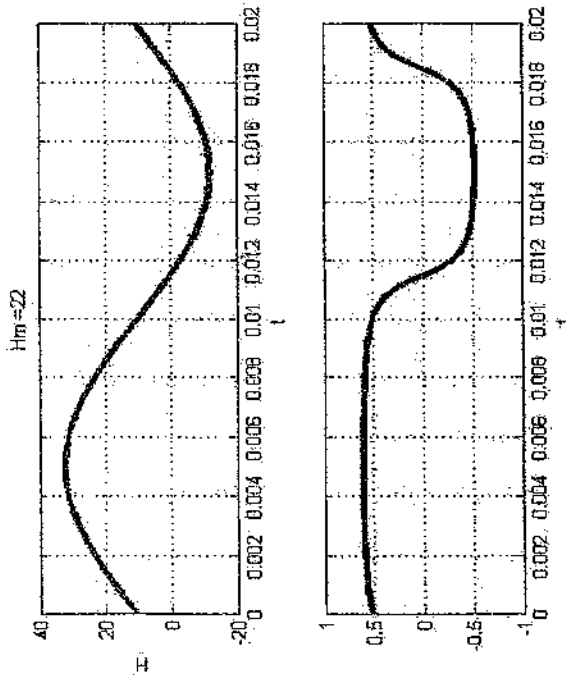
Электротехнические стали. Пермаллой. Магнитодиэлектрики. Ферриты. Особенности применения различных магнитных материалов. Типы сердечников и трансформаторов. Бронзевые, стержневые, кольцевые, подстрочные сердечники. Специальные типы трансформаторов. Влияние геометрических размеров сердечника на процесс перемагничивания. Конструкции магнитопроводов и катушек трансформаторов. Методы сборки трансформаторов. Конструкции катушек индуктивности. Катушки индуктивности с сердечником бронзового типа. Изоляционные материалы для изготовления катушек. Типы намоток, намоточные провода. Расчет индуктивностей рассеяния к собственной емкости катушек индуктивности. Методы уменьшения собственной емкости и потерь рассеяния. Потери энергии в магнитных элементах. Потери на гистерезис, Потери на вихревые токи. Потери в диэлектрических материалах. Методы уменьшения потерь. Вопросы стандартизации и унификации в магнитных элементах. Марки магнитных материалов. Типоразмеры магнитопроводов. Намоточные провода. Марки изоляционных материалов. Унифицированные трансформаторы.

```

%
% <<< respaag >>>
% Перемагничивание ферромагнетика синусоидальным полем
% в режиме источника тока (напряженность поля)
% при аппроксимации ОКН функцией  $V = a \cdot \arctg(b \cdot H)$ 
a=41; % аппроксимированные коэффициенты
b=28; %
Hm=22; % амплитуда напряженности
H0=10; % постоянная составляющая
f=50; % частота
ts=1/f; % период
ki=100; % количество интервалов в периоде
df=ts/ki; % длительность одного интервала
T=0:df:ts; % вектор времени
H=H0+Hm*sh(2*pi*f*T); % вектор напряженности
V=a*atan(b*H); % вектор индукции
subplot(2,1,1) % открытие первого окна
plot(T,H,'line Width',3) % построение зависимости H(t)
grid % формирование сетки
xlabel('V') % подпись оси абсцисс
ylabel('H') % подпись оси ординат
sh=axis('sh'); % связь представления амплитуды
s=axis('Hm =',sh); % формирование символической надписи
title(s) % вывод надписи
subplot(2,1,2) % открытие второго окна
plot(T,V,'line Width',3) % построение зависимости V(t)
grid % формирование сетки
xlabel('V') % подпись оси абсцисс

```

## Приложение 3



## ВВЕДЕНИЕ

Целью изучения дисциплины является подготовка студентов по направлению подготовки 140400 Электротехника и энергетика.

Основными задачами изучения дисциплины являются:

- получение студентами знаний о принципах функционирования элементов и устройств магнитного типа;
- приобретение навыков расчета их технических характеристик;
- применение полученных знаний и навыков при решении практических задач в процессе разработки устройств электротехники.

Дисциплина связана с предшествующими ей курсами математики, физики и требует знания разделов дифференциального исчисления, интегрального исчисления и теории функций комплексного переменного.

Изучение дисциплины рассчитано на 198 часов учебных занятий, из них аудиторных - 16 часов, самостоятельная работа - 182 часа. Дисциплина изучается в шестом и седьмом семестрах, форма контроля знаний: в шестом семестре - зачет, в седьмом - экзамен. В шестом семестре учебным планом также предусмотрено выполнение контрольной, а в седьмом семестре - курсовой работы.

Контрольная работа представляет собой задачу исследования процесса переманичивания ферромагнитного материала. Задания на контрольную работу выдаются в период установочной сессии. Они представлены в вариантах, приведенных в приложении 1. Студент выполняет тот вариант задания, номер которого соответствует его номеру в списке группы.

Контрольная работа представляется на проверку в полном объеме не позднее, чем за три дня до экзамена. Если работа не зачтена, преподаватель указывает, какую часть контрольных заданий переделать или выполнить вновь. Работа оценивается положительно, если правильно выполнено не менее 60% общего объема заданий.

УДК 621.314.3

Матричные элементы электронных устройств: Методические указания к выполнению контрольной работы / Сост. В. В. Юдин; РГАТУ имени П. А. Соловьева. – Рыбинск, 2014. – 14 с. – (Зачетная форма обучения / РГАТУ имени П. А. Соловьева).

Данные методические указания предназначены для выполнения контрольной работы студентами направления подготовки 140400 Электротехника и энергетика.

#### **СОСТАВИТЕЛЬ**

д-р. техн. наук, профессор В. В. Юдин

#### **ОБСУЖДЕНО**

на заседании кафедры электротехники  
и промышленной электроники

#### **РЕКОМЕНДОВАНО**

Методическим Советом РГАТУ имени П. А. Соловьева

Зав. РМО М. А. Салкова

Подписано в печать 9.01.2014 г.

Формат 60×84 1/16. Уч.-изд. л. 0,87. Тираж 50. Заказ 25.

Множественная лаборатория РГАТУ имени П. А. Соловьева  
152934, Рыбинск, ул. Пушкина, 53



Министерства  
науки 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*

РЫБИНСК  
2014