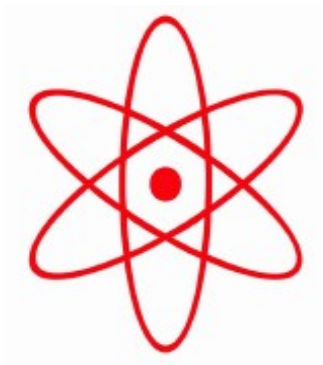


НПО УЧЕБНОЙ ТЕХНИКИ «ТУЛАНАУЧПРИБОР»

МЕТОДИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО ПО ВЫПОЛНЕНИЮ  
ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ



**ФЭЛ-4**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧКИ КЮРИ ФЕРРОМАГНЕТИКА**

Тула, 2010 г

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧКИ КЮРИ ФЕРРОМАГНЕТИКА

Цель работы: исследование температурной зависимости индукции магнитного поля в ферромагнетике, определение точки Кюри и вычисление магнитного момента молекулы ферромагнетика.

### ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ.

#### **Физические величины, описывающие магнитное поле в веществе и характеристики магнетиков.**

Всякое вещество является магнетиком, то есть способно под действием магнитного поля приобретать магнитный момент (намагничиваться). Для объяснения намагничивания тел Ампер предложил, что в молекулах вещества циркулируют круговые токи, которые обладают магнитным моментом и создают в окружающем пространстве магнитное поле.

В отсутствие внешнего поля ( $\mathbf{H} = \mathbf{0}$ ) молекулярные токи ориентированы хаотично, вследствие чего обусловленный ими результирующий магнитный момент равен нулю ( $\sum \mathbf{P}_{mi} = \mathbf{0}$ ). Под действием поля магнитные моменты молекул приобретают преимущественную ориентацию в одном направлении, вследствие чего суммарный магнитный момент вещества становится отличным от нуля - вещество намагничивается.

Намагниченность магнетика принято характеризовать магнитным моментом единицы объема. Эту величину называют вектором намагничивания (или намагниченности):

$$\vec{J} = \frac{\sum_{i=1} \vec{P}_{mi}}{\Delta V} \quad (\text{суммирование производится по объему } \Delta V).$$

Величина вектора намагничивания зависит от намагничивающего поля и может быть выражена следующим соотношением:

$$\vec{J} = \chi \cdot \vec{H} \quad (0-1)$$

где  $\chi_m$  - магнитная восприимчивость - величина, зависящая от природы вещества.

Таким образом, для описания магнитного поля а магнетика пользуются тремя векторами: вектором намагничения ( $\vec{J}$ ), вектором напряженности поля ( $\vec{H}$ ) и вектором магнитной индукции ( $\vec{B}$ ). Они взаимосвязаны следующим образом:

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{J}) \quad (0-2)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м — магнитная постоянная.

Или с учетом (0-1)

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \chi_m \vec{H}) = \mu_0 (1 + \chi_m) \vec{H} \quad (0-3)$$

Величина  $(1 + \chi_m)$  называется относительной магнитной проницаемостью вещества и обозначается  $\mu$ . Таким образом, в изотропных средах:

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu \mathbf{H} \quad (0-4)$$

Магнитная восприимчивость  $\chi_m$  бывает как положительной, так и отрицательной. Поэтому магнитная проницаемость  $\mu$  может быть как больше, так и меньше единицы. В зависимости от знака и величины магнитной восприимчивости все магнетики подразделяются на три группы:

- 1) диамагнетики, у которых  $\chi_m < 0$  и мала по абсолютной величине ( $\sim 10^{-6}$ );
- 2) парамагнетики, у которых  $\chi_m > 0$  и тоже мала ( $\sim 10^{-5} - 10^{-3}$ );
- 3) ферромагнетики, у которых  $\chi_m \gg 0$  и достигает очень больших значений ( $\sim 10^2 - 10^5$ ).

Кроме того, в отличие от диа- и парамагнетиков, для которых  $\chi_m$  не зависит от  $\mathbf{H}$ , магнитная восприимчивость ферромагнетиков является функцией напряженности магнитного поля.

Таким образом, в изотропных веществах вектор намагниченности может как совпадать по направлению с  $\mathbf{H}$  (пара- и ферромагнетики), так и быть направленным в противоположную сторону (диамагнетики). Для каждого ферромагнетика имеется определенная температура  $T_K$ , при которой области спонтанного намагничивания распадаются и вещество утрачивает ферромагнитные свойства (становится обычным парамагнетиком). Эта температура называется точкой Кюри.

### Температура Кюри.

Точка Кюри – это температура  $T_K$ , выше которой намагниченность каждого домена ферромагнетика равна нулю. Причина этого – разориентирующее тепловое движение молекул, в результате чего ферромагнетик переходит в парамагнитное состояние. По мере уменьшения температуры ферромагнетика от точки Кюри  $T_K$  его намагниченность ферромагнетика  $\mathbf{J}$  возрастает, так как магнитные моменты его молекул в пределах каждого домена стремятся выстроиться параллельно друг другу. При достаточно низких температурах магнитные моменты всех доменов устанавливаются вдоль внешнего магнитного поля: наступает магнитное насыщение, при котором намагниченность вещества  $\mathbf{J}_S$  максимальна. Её величина (магнитный момент

единицы объема образца) равна сумме магнитных моментов молекул в этом объеме:

$$J_s = n p_m, \quad (1)$$

здесь  $n$  – концентрация молекул ферромагнетика;  $p_m$  – магнитный момент одной молекулы.

Строго говоря, полное насыщение, для которого справедлива формула (1), возможно только при термодинамической температуре  $T=0$  К. Соответствующую этой температуре величину  $J_s(0)$  можно найти из связи магнитной индукции  $\vec{B}$  с намагниченностью вещества  $\vec{J}$  :

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{J}), \quad (2)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная.

Согласно выражению (2) намагниченность насыщения при  $T = 0$  К:

$$J_s(0) = \frac{1}{\mu_0} B_s(0) - H_s(0).$$

Так как  $H_s(0) \ll \frac{1}{\mu_0} B_s(0)$ , то

$$J_s(0) \approx \frac{1}{\mu_0} B_s(0) \quad (3)$$

Индекс «s» означает, что величины относятся к состоянию насыщения ферромагнетика. Магнитную индукцию насыщения  $B_s(0)$  можно найти экстраполяцией графика её температурной зависимости  $B_s=f(T)$  в область абсолютного нуля температуры.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ.

#### Методика измерений.

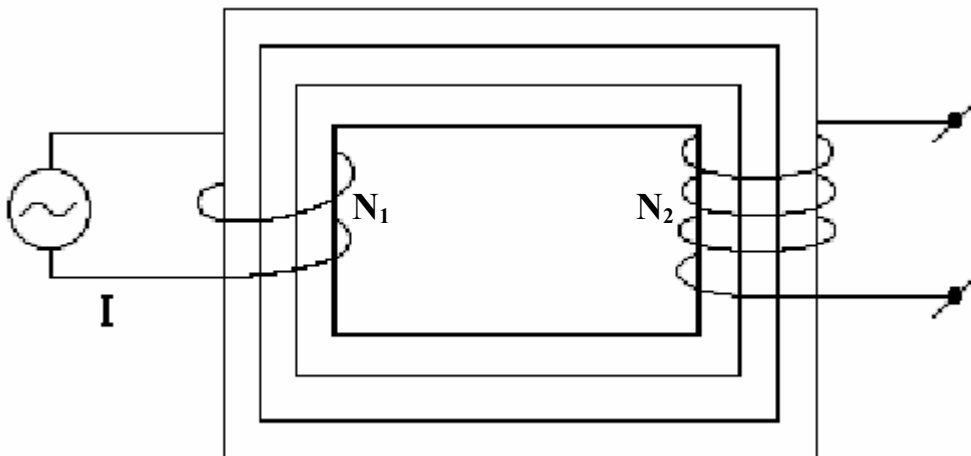


Рис. 1. Ход линий магнитной индукции в железе сердечника.

Опишем метод определения индукции магнитного поля в ферромагнетике. В данной работе изучается железо сердечника трансформатора, который при протекании тока в первичной (намагничивающей обмотке) намагничивается. Форма сердечника такова, что линии магнитной индукции проходят целиком в железе (рис.1).

В таком случае напряженность магнитного поля в ферромагнетике равна напряженности поля намагничивающих токов. Для определения напряженности поля используется формула для поля тороида, т. к. замкнутый сердечник трансформатора с намагничивающей обмоткой является разновидностью тороида:

$$H = \frac{I N_1}{l} = I n_1 \quad (4)$$

где  $I$  - сила тока,  $N_1$  - полное число витков,  $n_1 = \frac{N_1}{l}$  - число витков, приходящееся на единицу длины первичной (намагничивающей обмотки).

При протекании в намагничивающей обмотке переменного тока сердечник перемагничивается с частотой 50 раз в секунду. Вектор магнитной индукции описывает полную петлю гистерезиса за одно колебание тока (1/50 секунды). Максимальное значение напряженности поля ( $H_{max}$ ) будет зависеть от амплитудного значения тока.

$$H_{max} = I_{max} \cdot n_1 \quad (5)$$

Максимальное значение тока можно заменить эффективным, которое непосредственно измеряется прибором:

$$I_{max} = I_{эф} \cdot \sqrt{2} \quad ; \quad H_{max} = n_1 I_{эф} \cdot \sqrt{2} \quad (6)$$

Для определения соответствующего максимального значения магнитной индукции  $B_{max}$  используется явление электромагнитной индукции в измерительной обмотке  $N_2$  трансформатора.

Допустим, ток в намагничивающей  $N_1$  обмотке  $I$  изменяется по закону:

$$I = I_{max} \sin \omega t, \quad (7)$$

где  $I_{max}$  - амплитудное (максимальное) значение тока,  
 $\omega$  - циклическая частота.

Тогда магнитный поток  $\Phi$ , пронизывающий поперечное сечение сердечника, должен меняться по тому же закону:

$$\Phi = \Phi_{max} \sin \omega t \quad (8)$$

где  $\Phi_{max}$  - максимальный поток, который можно выразить через максимальное значение магнитной индукции  $B_{max}$  и площадь  $S$  поперечного сечения сердечника:

$$\Phi_{max} = B_{max} \cdot S \quad (9)$$

При этом в разомкнутой измерительной обмотке трансформатора с числом витков  $N_2$  возникает э. д. с. индукции:

$$E = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} = -N_2 \frac{d}{dt}(\Phi_m \sin \omega t) = -N_2 \Phi_m \omega \cos \omega t = \\ = -N_2 \omega B_m \cdot S \cos \omega t \quad (10)$$

Э. д. с. индукции будет максимальной, когда  $\cos \omega t = -1$ :

$$E_{\max} = N_2 \omega B_{\max} \cdot S \quad (11)$$

Отсюда  $B_{\max} = \frac{E_{\max}}{N_2 \omega S}$  где  $\omega = 2\pi\nu$ ,  $\nu = 50$  Гц. (12)

Вольтметр, подключенный к измерительной обмотке  $N_2$ , показывает не амплитудное, а эффективное значение напряжения  $U_{\text{эф.}} \approx E_{\text{эф.}}$ . Тогда:

$$B_{\max} = \frac{U_{\text{эф.}} \cdot \sqrt{2}}{2\pi\nu S N_2} ; \quad B_{\max} = k \cdot U_{\text{эф.}} \quad (13)$$

Таким образом, измеряя ток в намагничивающей обмотке  $N_1$  и э.д.с. индукции в измерительной обмотке  $N_2$  трансформатора, можно найти напряженность поля ( $H_m$ ) и соответствующую ей магнитную индукцию  $B_m$  в сердечнике. Точки с координатами ( $H_m$ ,  $B_m$ ) лежат на кривой первоначального намагничивания.

### Приборы и оборудование.

Для определения точки Кюри в данной работе применяется установка, упрощённая принципиальная блок-схема которой приведена на рис. 2.

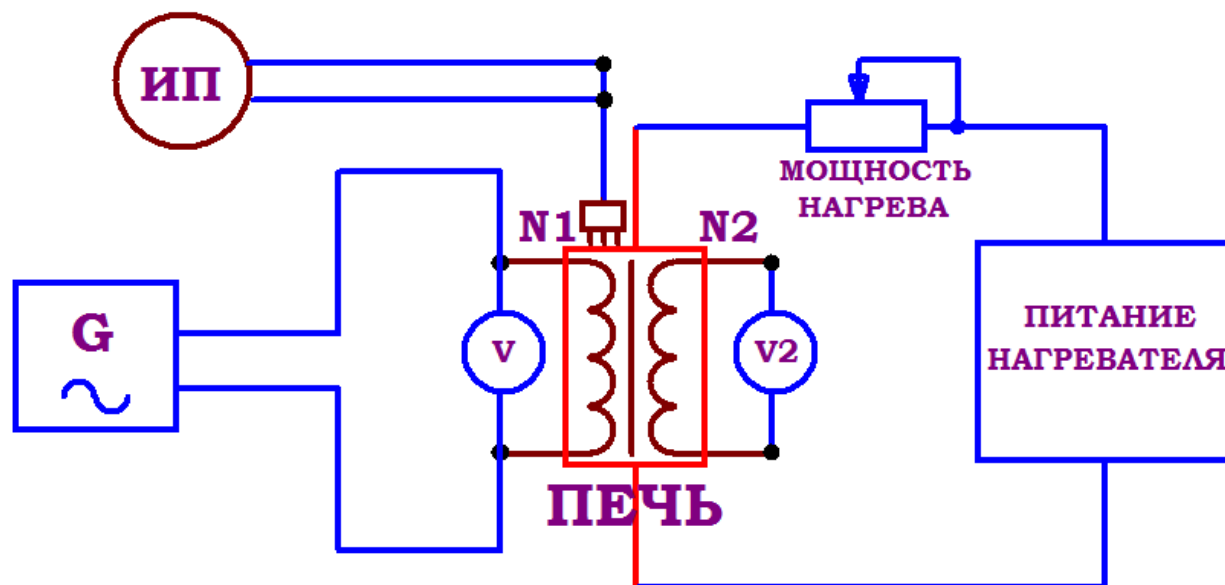


Рис. 2. Принципиальная электрическая блок-схема установки для определения точки Кюри ферромагнетика ФЭЛ-4.

Исследуемый образец (трансформатор с ферромагнитным сердечником и двумя обмотками — намагничивающей  $N_1$  и измерительной  $N_2$ ) нагревается резистором. При протекании переменного напряжения через первичную обмотку трансформатора (значение которого измеряется вольтметром  $U$  и остаётся постоянным в течение опыта) индуцируется напряжение во вторичной обмотке. Это напряжение регистрируется вольтметром  $U_2$ .

Конструктивно установка состоит электропечи с регулируемой мощностью нагрева (резистор) под который помещается исследуемый образец ферромагнетика (трансформатор с ферромагнитным магнитопроводом). Температура  $t$  в электропечи измеряется высокоточным цифровым термодатчиком, также введенным в полость электропечи. Сигнал с термодатчика подается через встроенное АЦП на измерительный прибор ИП и регистрируется в градусах Цельсия. Точность измерения температуры термодатчика составляет  $\pm 1$  °С. Все измеренные и контролируемые параметры (мощность нагрева  $P$ , температура  $t$  а также напряжение на первичной обмотке  $U$  и на вторичной  $U_2$ ) выводятся на LCD ЖКД дисплей.

Скорость нагрева регулируется с помощью кнопок «МОЩНОСТЬ НАГРЕВАТЕЛЯ». Удержание кнопок приводит к плавному возрастанию мощности печи. Для охлаждения предусмотрена возможность включения кулера нажатием кнопки «ОХЛАЖДЕНИЕ». Отключение кулера осуществляется нажатием той же кнопки. При перегревании электропечи свыше 100 °С срабатывает автоматическое включение охлаждения, а

электропечь отключается.

При достижении температуры Кюри магнитные свойства образца изменяются, вследствие чего э.д.с. индукции во вторичной обмотке резко падает, что отмечается вольтметром  $U_2$ .

#### Порядок выполнения.

1. Перед началом работы ознакомится с принципиальной схемой учебной установки рис. 2, разобраться в назначении ручек, кнопок и измерительного прибора. Проверить целостность сетевого провода

2. Включить установку в сеть  $\sim 220$  В. Поставить переключатель «СЕТЬ» на панели учебного модуля в положение «ВКЛ», при этом должен загореться сигнальный индикатор.

3. Дать установке прогреться в течение трех минут.

4. Подготовить таблицу 1 для записи результатов измерения зависимости эффективного значения напряжения во вторичной обмотке от температуры. Во время нагрева в таблицу следует записывать показание вольтметра  $U_2$  и температуру электропечи в  $^{\circ}\text{C}$  через каждые  $2^{\circ}\text{C}$ , остальные расчеты проводить после включения охлаждения.

Таблица 1

$t, ^{\circ}\text{C}$	$U_2, \text{В}$	$B_s, \text{Тл}$
30	...	
32	...	
34	...	
...	...	

$T_K = \dots \text{К}$

5. Установить мощность нагрева печи равную 45-55 % от максимальной с помощью кнопок «МОЩНОСТЬ НАГРЕВАТЕЛЯ», приступить к снятию зависимости  $U_2$  от температуры  $t$ , записывая через 2 градуса значение показаний вольтметра  $U_2$  и температуры. Измерение рекомендуется начинать при достижении в электропечи температуры  $t \approx 28-30^{\circ}\text{C}$ , когда печь достаточно равномерно прогреется и производить до температуры  $t \approx 75^{\circ}\text{C}$ .

6. При достижении температуры  $45-50^{\circ}\text{C}$  мощность нагрева рекомендуется повысить до 70-90 %.

7. Нагрев производить до температуры  $t \approx 75^{\circ}\text{C}$ , после чего включить систему охлаждения нажатием кнопки «ОХЛАЖДЕНИЕ». Охлаждать нагреватель следует в течение получаса до достижения практически комнатной температуры  $\approx 25-30^{\circ}\text{C}$ .



8. При построении для последующих расчетов необходимо перевести все измеренные значения в СИ, температуру выразить в Кельвинах:

$$T[\text{K}] = t[^\circ\text{C}] + 273$$

9. Построить график зависимости эффективного значения напряжения с выхода второй обмотки от абсолютной температуры  $U_2=f(T)$ .

10. По данным таблицы 1, исходя из измеренных значения напряжения  $U_2$ , рассчитайте по формуле (13) значения магнитной индукции  $B_{\text{max}} \sim B_s$  для каждой температуры. Рассчитанные значения занесите в табл. 1. Данные для расчётов: количество витков вторичной обмотки  $N_2=500$ ; частота питания  $\nu=50$  Гц; площадь поперечного сердечника  $S=4 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>.

11. Используя данные расчетов постройте график зависимости  $B_s=f(T)$ , начиная ось температур с 0 К. Для построения графика зависимости магнитной индукции насыщения  $B_s$  от температуры ферромагнетика измеряют напряжение  $U_2$  при нагревании образца. По мере роста температуры индукция насыщения (а значит и напряжение, регистрируемое вольтметром  $U_2$ ) уменьшается, а напряженность магнитного поля остается постоянной, так как она от температуры не зависит. Кюри вырождается в прямую линию. В эксперименте получают зависимость  $B_s = f(T)$  вид которой показан на рис. 3. Участок кривой (1–N) проводят по опытным точкам. При этом ось температуры на графике начинается с 0 К. Для определения  $B_s(0)$  из точки 1 продолжают зависимость  $B_s = f(T)$  до  $T = 0$  К двумя линиями: проводят нормаль к оси  $B_s$  и касательную к кривой на начальном участке. Точки пересечения этих линий с осью  $B_s$  дают интервал  $\Delta B_s$ , внутри которого лежит искомая величина

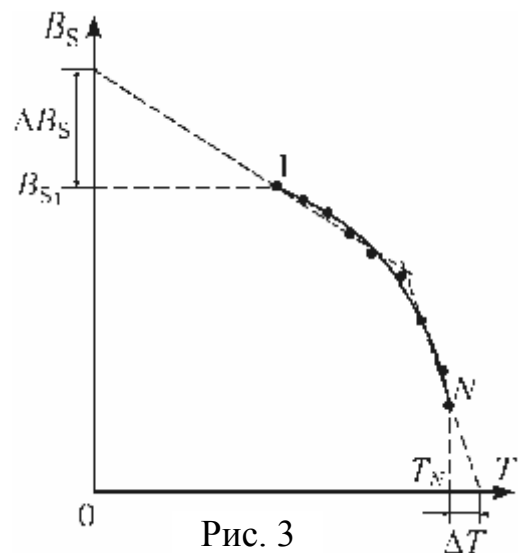


Рис. 3

$$B_s(0) = B_{s1} + \frac{1}{2} \Delta B_s.$$

12. Оценить по графику  $B_s=f(T)$  значение индукции насыщения при температуре 0 К.

13. Используя найденное значение  $B_s(0)$ , можно по формуле (3) оценить намагниченность  $J_s(0)$  при насыщении, а затем с помощью соотношения (1) – величину магнитного момента  $p_m$  молекулы ферромагнетика.

14. Произвести оценки индукции насыщения  $B_s(0)$  и намагниченности  $J_s(0)$  при насыщении при  $T=0$  К. В данной работе ферромагнитный образец (сердечник) выполнен из сплава Mn–Zn, для которого концентрацию молекул

следует принять равной  $n = 1,4 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ .

15. По графику зависимости  $\mathbf{B}_s = f(T)$  можно также определить температуру Кюри  $T_K$  данного ферромагнетика. Если последняя экспериментальная точка N близка к оси температур, то при нагревании была достигнута температура Кюри; при этом точка пересечения опытной кривой с осью T (где  $\mathbf{B}_s = 0$ ) дает значение  $T_K$ . Если же последняя экспериментальная точка отстоит далеко от оси температур, то температуру Кюри находят путем экстраполяции опытной зависимости до значения  $\mathbf{B}_s = 0$ . Для этого, аналогично описанному выше рис. 3, продолжают кривую из конечной точки N до оси температур двумя линиями (касательной к кривой и нормалью к оси), и по найденному интервалу  $\Delta T$  оценивают в первом приближении значение температуры Кюри  $T_K$ :

$$T_K = T_N + \frac{1}{2} \Delta T.$$

16. Оценить по графику  $\mathbf{B}_s = f(T)$  температуру Кюри  $T_K$  данного ферромагнетика.

17. Сравнить магнитный момент молекулы исследуемого ферромагнетика  $\mathbf{p}_m$  с величиной спинового магнитного момента электрона, равной магнетону Бора  $\mu_B = 0,927 \cdot 10^{-23} \text{ А/м}^2$ .

18. По окончании работы поставить переключатель «СЕТЬ» в положение «выкл», при этом должен погаснуть сигнальный индикатор и вынуть вилку из розетки.

**КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

- 1) Что такое точка Кюри?
- 2) Начертите и объясните схему установки.
- 3) Почему э.д.с. индукции во вторичной обмотке резко уменьшается при достижении образцом точки Кюри?
- 4) Как классифицируются магнетики?
- 5) Почему значение  $\mu$  для ферромагнетиков велико?
- 6) Почему при определенной температуре ферромагнетики изменяют свои магнитные свойства?
- 7) Объясните методику определения точки Кюри и магнитного момента молекулы ферромагнетика, применяемую в данной работе.

**РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА**

1. А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. "Курс общей физики". — М.: Высшая школа, 1989г.
2. В. И. Иверонова и др. "Физический практикум". — М.: Физико-математическая литература, 1962г.
3. В. С. Попов. "Теоретическая электротехника". — М.: Энергоатомиздат, 1990г.
4. Т. И. Трофимова. "Курс физики". — М.: Высшая школа, 1998г.
5. Д. Джанколи. "Физика". Том II. — М.: Мир, 1989г.
6. Г. Г. Рекус, В. Н. Чесноков. "Лабораторные работы по электротехнике и основам электроники". — М.: Высшая школа, 1989г.

**ДЛЯ СВОБОДНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ  
НПО УЧЕБНОЙ ТЕХНИКИ «ТУЛАНАУЧПРИБОР»**