

Т.И. ЧЕРНЫШОВА, М.В. МАКАРЧУК

РАДИОМАТЕРИАЛЫ И РАДИОКОМПОНЕНТЫ

ИЗДАТЕЛЬСТВО ТГТУ

УДК 621.37
ББК 3843
Ч-497

Рекомендовано Редакционно-издательским советом университета

Рецензент

Доктор технических наук, профессор кафедры
«Автоматизированные системы и приборы» ТГТУ
А.А. Чуриков

Чернышова, Т.И.

Ч-497 Радиоматериалы и радиокомпоненты : лабораторные работы / Т.И. Чернышова, М.В. Макарчук. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. – 80 с. – 100 экз.

Представлены лабораторные работы, в которых даны методические указания, описание последовательности выполнения, контрольные вопросы и рекомендуемая литература по исследованию электрических и конструктивных параметров катушек индуктивности, трансформаторов, линий задержки, конденсаторов, элементов коммутации.

Предназначены для студентов 2 курса специальности 210303 – Бытовая радиоэлектронная аппаратура дневной и заочной форм обучения.

УДК 621.37

ББК 3843

© ГОУ ВПО «Тамбовский государственный
технический университет» (ТГТУ), 2008

Т.И. ЧЕРНЫШОВА, М.В. МАКАРЧУК

РАДИОМАТЕРИАЛЫ И РАДИОКОМПОНЕНТЫ

Лабораторные работы
для студентов 2 курса специальности 210303
«Бытовая радиоэлектронная аппаратура»
дневной и заочной форм обучения



Тамбов
◆ Издательство ТГТУ ◆
2008

Учебное издание

ЧЕРНЫШОВА Татьяна Ивановна,
МАКАРЧУК Максим Валерьевич

РАДИОМАТЕРИАЛЫ И РАДИОКОМПОНЕНТЫ

Лабораторные работы

Редактор Ю.В. Ш и м а н о в а
Инженер по компьютерному макетированию М.А. Филатова

Подписано в печать 10.12.2008.
Формат 60 × 84/16. 4,65 усл. печ. л. Тираж 100 экз. Заказ № 558.

Издательско-полиграфический центр
Тамбовского государственного технического университета
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

ВВЕДЕНИЕ

Данные указания к лабораторным работам предназначены для студентов, изучающих дисциплину «Радиоматериалы и радиокомпоненты» в рамках учебного плана подготовки бакалавров и дипломированных специалистов по направлению 210300 «Радиотехника» и специальности 210303 «Бытовая радиоэлектронная аппаратура».

Все лабораторные работы выполняются на лабораторных стендах, содержащих необходимые источники питания, индикаторные устройства и сборочное поле для монтажа исследуемых элементов. В лабораторных работах исследуются катушки индуктивности, трансформаторы питания, пьезоэлектрические фильтры, полупроводниковые конденсаторы переменной ёмкости, герконы, проводниковые материалы (линейные резисторы) и полупроводниковые материалы (нелинейные резисторы). В целях достижения максимальной пользы от полученных теоретических знаний и развития первых практических навыков монтажа электронных устройств студентам предоставляется возможность самостоятельно произвести соединения исследуемых элементов с измерительной схемой. Исследования характеристик элементов выполняются с помощью современных цифровых мультиметров и осциллографа. Для исследований предлагаются элементы отечественного и зарубежного производства. Справочные данные на некоторые элементы находятся в приложении, где также приведены полезные сведения о рядах номиналов резисторов и конденсаторов и система обозначений отечественных конденсаторов и резисторов.

Лабораторная работа 1

ИССЛЕДОВАНИЕ КАТУШЕК ИНДУКТИВНОСТИ

Цель работы: изучение влияния конструкции катушек индуктивности на их электрические параметры.

Содержание работы

1. Ознакомление с конструкцией цилиндрических, плоских печатных катушек индуктивности.
2. Изучение методики исследования основных электрических параметров катушек.
3. Исследование зависимости величины индуктивности катушки от положения сердечника в ней.

Методические указания

К основным электрическим характеристикам катушек относятся индуктивность L , добротность Q , собственная ёмкость C_L , которая влияет на собственную резонансную частоту f_0 , температурный коэффициент индуктивности (ТКИ).

В индуктивности скорость изменения тока зависит от приложенного напряжения. Уравнение индуктивности имеет следующий вид: $U = L(dI / dt)$. Напряжение, приложенное к индуктивности, вызывает нарастание протекающего через неё тока, причём изменение тока происходит по линейному закону. Напряжение величиной 1 В, приложенное к индуктивности 1 Гн, приводит к нарастанию тока через индуктивность со скоростью 1 А в 1 с. В отличие от резистора, мощность, связанная с током через индуктивность (произведение U на I), не преобразуется в тепло, а сохраняется в виде энергии магнитного поля индуктивности. Эту энергию можно извлечь, если прервать ток через индуктивность. Условно индуктивность изображают в виде нескольких витков провода – такую конструкцию имеет простейшая катушка индуктивности.

В зависимости от выбранного рабочего диапазона частот индуктивная катушка может быть представлена либо как сопротивление r (при постоянном токе – рис. 1.1, а), либо как индуктивность L с последовательно включённым сопротивлением r (при низких частотах – рис. 1.1, б), либо как индуктивность L и сопротивление r , соединённые параллельно с ёмкостью C (при высоких частотах – рис. 1.1, в).

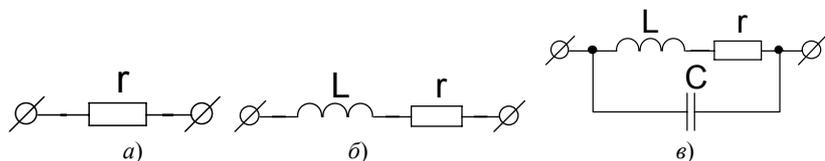


Рис. 1.1. Электрические схемы замещения индуктивной катушки

Добротность катушки во многих случаях определяет резонансные свойства и КПД контура. Отношение реактивного сопротивления к активному называется добротностью Q . Добротность катушки $Q = \omega L / r$ при заданной частоте ω и индуктивности L определяется её активным сопротивлением r . Активное сопротивление катушки складывается из сопротивления провода тока высокой частоты, сопротивления, вносимого диэлектрическими потерями в каркасе, сопротивлений, вносимых потерями в экранях, сердечниках и т.п. Значение того или иного слагаемого определяется частотой.

Катушки индуктивности обладают собственной ёмкостью, обусловленной распределённой ёмкостью между отдельными витками, и ёмкостью между обмоткой и корпусом прибора. Чем больше размеры катушки, тем сильнее сказывается последнее слагаемое.

Частота, на которую оказывается настроенным контур, состоящий из индуктивности и собственной ёмкости, называется собственной частотой катушки f_0 . Собственная ёмкость увеличивает действующую индуктивность, понижает стабильность и несколько уменьшает добротность катушки.

Электрические параметры определяются конструкцией катушек. Обмотки индуктивных катушек могут быть однослойные (рис. 1.2, а), многослойные (рис. 1.2, б), плоские спиральные (рис. 1.5, а, б). По конструкции катушки изготавливают без сердечника и с сердечником: стержневым, броневым, тороидальным; с экраном и без экрана. Максимальная величина индуктивности ограничивается малым значением добротности и низкой собственной резонансной частотой.

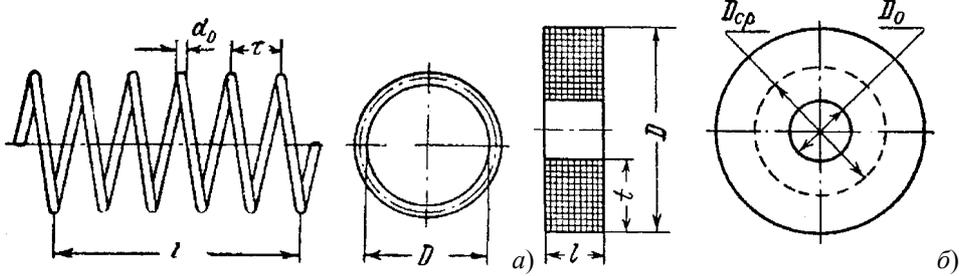


Рис. 1.2. Катушка индуктивности бескаркасная:
а – однослойная с шагом; б – многослойная

Индуктивность катушки без сердечника в общем случае зависит от числа витков N , длины l , см, диаметра намотки D , см и определяется по формуле

$$L = L_0 N^2 D \cdot 10^{-3}, \text{ мкГн.} \quad (1.1)$$

Значение коэффициента L_0 , зависящего от l/D , приведены на рис. 1.3 (для $t/D = 0$).

Для определения индуктивности многослойных катушек можно также воспользоваться формулой (1.1), однако в этом случае $L_0 = f(t/D; l/D)$, т.е. определяется ещё и величиной t , где t – радиальная толщина обмотки, см; l – длина намотки, см; D – наружный диаметр катушки, (рис. 1.2, б).

При намотке с шагом индуктивность катушки определяется выражением

$$L = L_1 - 2\pi N D (A + B) \cdot 10^{-3}, \text{ мкГн,} \quad (1.2)$$

где A – поправочный коэффициент, учитывающий разницу в индуктивности витка из круглого провода и из узкой ленты; B – поправочный

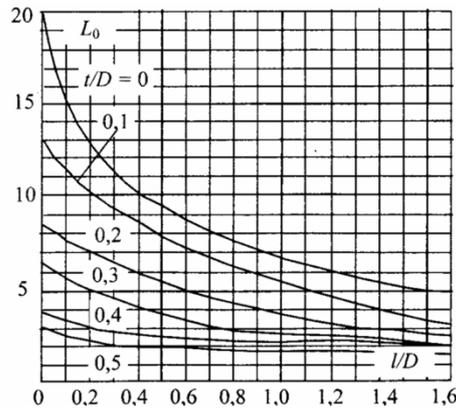


Рис. 1.3. Графики значений коэффициента L_0 для многослойных катушек

коэффициент, учитывающий разницу во взаимной индуктивности между действительными витками и витками сплошной намотки из тонкой узкой ленты; L_1 – индуктивность катушки с однослойной сплошной намоткой. Коэффициенты A и B определяются по графикам на рис. 1.4, где d – диаметр провода, см; τ – шаг намотки, см.

При значении $l/D < 5$ индуктивность катушки с однослойной намоткой можно определить по формуле

$$L = \frac{N^2 D^2 \cdot 10^{-2}}{l/D + 0,44}, \text{ мкГн,} \quad (1.3)$$

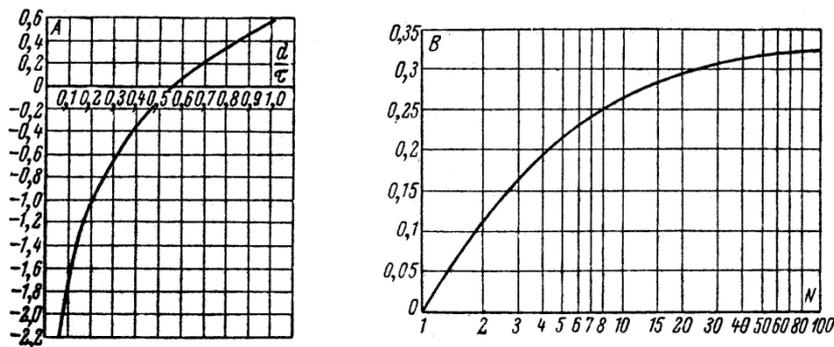


Рис. 1.4. Значения коэффициентов A и B

а для катушек с шагом в этом случае индуктивность можно определить как

$$L = L_1 - 0,5ND(\ln(\tau/d) - 0,6) \cdot 10^{-3}, \text{ мкГн.} \quad (1.4)$$

Индуктивность катушек с многослойной намоткой рассчитывается по формуле

$$L = \frac{8N^2 D_{cp} \cdot 10^{-2}}{3D_{cp} + 9l + 10t} \left[\ln\left(\frac{d_0}{d}\right) + 0,1 \right] \cdot 10^{-3}, \text{ мкГн,} \quad (1.5)$$

где d_0 – диаметр провода в изоляции, мм; D_{cp} – средний диаметр намотки, см; $t = \frac{\alpha d_0^2 N}{l}$ – радиальная толщина обмотки, см, где $\alpha = 1,05 \dots 1,3$ – коэффициент неплотности укладки провода обмотки.

Индуктивность катушки с магнитным сердечником можно определить по выражению

$$L_c = \mu_c \cdot L, \text{ мкГн,} \quad (1.6)$$

где L – индуктивность катушки без сердечника; μ_c – действующая магнитная проницаемость материала сердечника. Цилиндрические сердечники используются и как средство увеличения индуктивности, и как элемент подстройки.

Индуктивность плоской печатной катушки со спиральными витками (рис. 1.5, а) может быть определена по формуле

$$L = 24,75 D_{cp} \sqrt[3]{N^5} \lg(4D_{cp}/t) \cdot 10^{-3}, \text{ мкГн,} \quad (1.7)$$

а индуктивность плоской печатной катушки, витки которой расположены по сторонам квадрата (рис. 5, б), по формуле

$$L = 55,5 a \sqrt[3]{N^5} \lg(8a/t) \cdot 10^{-3}, \text{ мкГн,} \quad (1.8)$$

где D_{cp} – средний диаметр спирали, см; a – длина средней стороны квадрата, см; t – радиальная ширина намотки, см. Очевидно, что $D_{cp} = 0,5(D_{нн} + D_{вн})$ и $a = 0,5(A_{нн} + A_{вн})$; $t = 0,5(D_{нн} - D_{вн})$ или $t = 0,5(A_{нн} - A_{вн})$.

Добротность катушек рассчитывается по формуле

$$Q = \frac{2\pi f L}{R_M + R_{C_L} + R_{\mu} + R_{\sigma}}, \quad (1.9)$$

где f – частота, Гц; L – индуктивность катушки, Гн; R_M – сопротивление провода тока высокой частоты, Ом; R_{C_L} – сопротивление потерь в

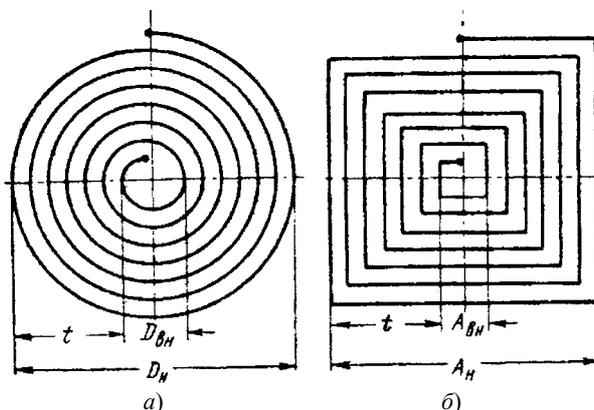


Рис. 1.5. Плоская катушка индуктивности:
а – спиральная; б – квадратная

собственной ёмкости катушки, Ом; R_{μ} – сопротивление потерь, вносимое сердечником, Ом; R_3 – сопротивление, вносимое экраном.

На частотах f , меньших 10 МГц, величина сопротивления провода току высокой частоты R_M определяется по формуле

$$R_M = R_{M0} \left[F(z) + \left(\frac{kNd}{2D_{cp}} \right)^2 G(z) \right], \quad (1.10)$$

где $F(z)$ и $G(z)$ – функции Бесселя от переменной $z = 0,106d\sqrt{f}$; d – диаметр провода без изоляции, см; f – частота тока, протекающего через катушку, Гц; $k = f(l/D)$ – коэффициент; l – длина намотки, см; D_{cp} – средний диаметр обмотки, см; N – число витков катушки. Графики значений функций $F(z)$ и $G(z)$ представлены на рис. 1.6, а. Графики значений коэффициентов $k = f(l/D)$ изображены на рис. 1.6, б.

Сопротивление постоянному току цилиндрической катушки с простой многослойной намоткой из одножильного медного провода:

$$R_{M0} = \rho \frac{4D_{cp}N}{d^2} \approx \frac{7D_{cp}N \cdot 10^{-5}}{d^2}, \text{ Ом}, \quad (1.11)$$

где D_{cp} и d выражаются в мм, а удельное сопротивление ρ – Ом·м.

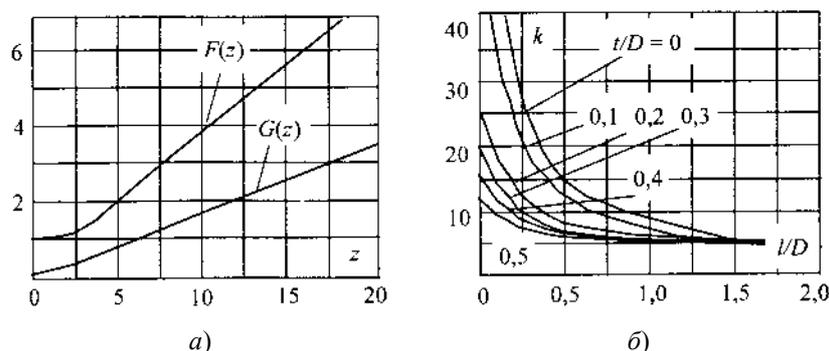


Рис. 1.6. Графики значений:
а – функций Бесселя $F(z)$ и $G(z)$; б – коэффициента $k = f(l/D)$

Расчёт сопротивления провода однослойных катушек метрового диапазона, применяемых в системах КВ и УКВ радиотелефонной и телевизионной связи (30 ... 300 МГц), производится по формуле

$$R_M = \frac{0,525DN\sqrt{f}}{d} \cdot 10^{-3}, \text{ Ом}, \quad (1.12)$$

где D – диаметр катушки, см; d – диаметр провода без изоляции, см; f – частота, МГц.

Величина сопротивления потерь в собственной ёмкости R_{CL} , Ом, рассчитывается по формуле

$$R_{CL} = (2\pi f)^3 L^2 C_L \text{tg}\delta_{из}, \quad (1.13)$$

где $\text{tg}\delta_{из}$ – тангенс угла диэлектрических потерь изоляции провода и каркаса катушки. В катушках малого размера с каркасами из ультрафарфора или полистирола диэлектрические потери получаются ничтожно малыми. В многослойных катушках наблюдается концентрация электрического поля внутри обмотки, поэтому диэлектрические потери в изоляции провода обычно превышают потери в каркасе. Тангенс угла потерь различных марок изоляции провода имеет следующие значения:

Для эмали (ПЭЛ) 0,018 ($\epsilon = 4 \dots 6$)
 Для шёлка (ПШО, ПШД) 0,04 ($\epsilon = 2 \dots 3$)
 Для хлопчатобумажной пряжи (ПБО, ПБД) 0,36

Собственная ёмкость катушки индуктивности повышает потери в ней, увеличивает неустойчивость. Ёмкость однослойной цилиндрической катушки рассчитывается по формуле

$$C_L = \frac{\pi D}{8,31 \lg \left(\frac{\tau}{d} - \sqrt{\frac{\tau^2}{d^2} - 1} \right)}, \text{ пФ}. \quad (1.14)$$

Для большинства практических случаев собственная ёмкость может быть рассчитана по формуле

$$C_L = kk_1 D, \text{ пФ}, \quad (1.15)$$

где k – коэффициент, величина которого зависит от соотношения между шагом намотки и диаметром провода (рис. 1.7, а); k_1 – коэффициент, величина которого зависит от соотношения между длиной и диаметром катушки (рис. 1.7, б).

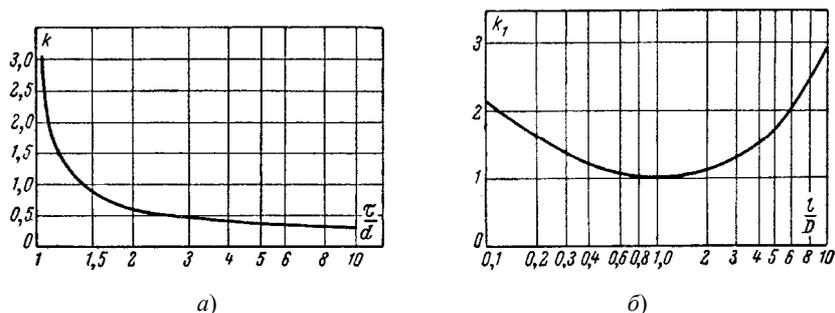


Рис. 1.7. Графики значений коэффициентов k и k_1 для расчета собственной емкости однослойных катушек

Ёмкость многослойных катушек не поддается точному расчёту, но приблизительно её можно определить по той же формуле, приняв $\tau = d_0 - d$.

Порядок выполнения работы

1. Используя методические указания и формулы, рассчитать индуктивность, собственную ёмкость, добротность на частоте ___ кГц катушек индуктивностей, предложенных преподавателем, предварительно измерив их геометрические параметры. Результаты занести в таблицы, соответствующие каждому виду катушки.

1.1. Результаты измерений и расчётов для катушек с сплошной однослойной обмоткой

№ катушки	Число витков N	Диаметры		Длина обмотки l , мм	Частота рабочая, кГц	L , мкГн		C , пФ	Q расчётная
		катушки, см	провода, мм			расчётная	экспериментальная	расчётная.	

1.2. Результаты измерений и расчётов для катушек с однослойной обмоткой с шагом

№ катушки	Число витков N	Диаметры		Шаг обмотки τ , мм	Частота рабочая, кГц	L , мкГн		C , пФ	Q расчётная
		катушки, см	провода, мм			расчётная	экспериментальная	расчётная.	

1.3. Результаты измерений и расчётов для катушек с сплошной многослойной обмоткой

№ катушки	Число витков N	Диаметры		Длина обмотки l , мм	Радиальная толщина обмотки τ , см	L , мкГн		C , пФ расчётная
		катушки, см	провода, мм			расчётная	экспериментальная	

1.4. Результаты измерений и расчётов для плоской печатной спиральной катушки

№ катушки	Число витков N	Диаметры		Радиальная толщина обмотки τ , см	L , мкГн	
		внешний, см	внутренний, см		расчётная	экспериментальная

1.5. Результаты измерений и расчётов для плоской печатной квадратной катушки

№ катушки	Число витков N	Сторона квадрата		Радиальная толщина обмотки τ , см	L , мкГн	
		внешняя, см	внутренняя, см		расчётная	экспериментальная

1.6. Результаты измерений индуктивности цилиндрических катушек с сердечником

№ катушки	Положение сердечника в катушке	Сердечник		
	Величина измеренной индуктивности, мкГн	отсутствует в катушке	погружен на половину	полностью погружен

2. Исследовать зависимость индуктивности цилиндрических катушек от глубины погружения регулировочного сердечника, заполнить для каждой катушки индуктивности таблицу.

Измерения индуктивности катушек проводятся с помощью измерителя индуктивностей и ёмкостей Е7-5А.

Прибор предназначен для измерения индуктивностей в диапазоне 0,05 мкГн – 100 мГн и ёмкостей в диапазоне 1...500 пФ. Измерение прибором производится резонансным методом с индикацией резонанса методом нулевых биений. Электрическая функциональная схема прибора приведена на рис. 1.8.

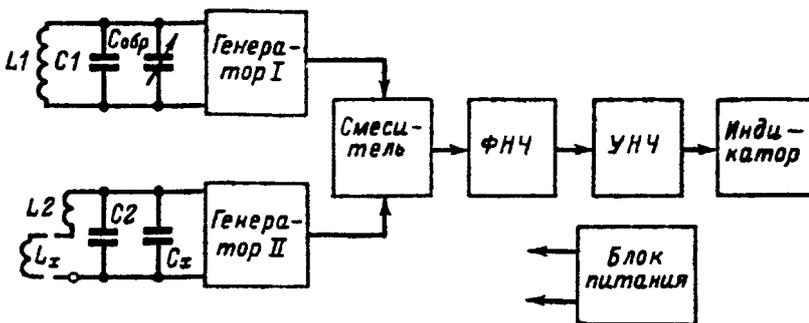


Рис. 1.8. Электрическая функциональная схема измерителя индуктивностей и ёмкостей Е7-5А

В колебательный контур генератора I включён образцовый конденсатор переменной ёмкости $C_{обр}$, в контур генератора II включается измеряемая индуктивность или ёмкость. При этом измеряемая индуктивность включается с контурной L_2 последовательно.

Перед измерениями при отсутствии во втором контуре измеряемых индуктивности или ёмкости и замкнутых накоротко зажимах L_x производится настройка обоих генераторов на одну и ту же частоту. Контроль настройки производится по нулевым биениям.

При включении в контур генератора II измеряемой индуктивности L_x равенство частот генераторов восстанавливается путём изменения ёмкости образцового конденсатора $C_{обр}$. При этом $(C_{обр} + C_1)L_1 = C_2(L_2 + L_x)$, откуда $L_x = L_1C_{обр}/C_2 = kC_{обр}$. Из последнего равенства следует, что при постоянных L_1 и C_2 шкала образцового конденсатора $C_{обр}$ может быть градуирована в значениях индуктивности.

При измерении индуктивностей изменение поддиапазонов измерений производится переключателем *Множитель К*. Перед проведением измерений производится начальная настройка при помощи ручки *Начальная установка*, при замкнутых зажимах L_x . Измеряемая индуктивность (в микрогенри) определяется как произведение отсчёта C_2 на величину, установленную переключателем *Множитель К*. Индикация равенства частот двух генераторов производится по электронному оптическому индикатору зеленого свечения. При большой расстройке генераторов световой сектор индикатора минимален. При уменьшении расстройки генераторов световой сектор увеличивается, засвечивая весь экран, и при равенстве частот снова уменьшается – на экране вертикальная светлая полоса.

Измерения производить в следующей последовательности:

- а) установить перемычку между зажимами « L » и « L_x », если она не установлена;
- б) вращая ручки C_2 и C_3 установить соответствующие указатели на отсчёт «0»;
- в) установить переключатель *Множитель К* на ожидаемый поддиапазон измерений ($L : 0,01; 0,1; 1; 10; 100$);
- г) вращая ручку *Начальная установка*, добиться появления увеличенного светового сектора на оптическом индикаторе;
- д) при появлении сплошного светового сектора медленно вращать ручку до появления на экране светлой узкой полоски;
- е) установить вместо перемычки исследуемую катушку индуктивности;
- ж) вращая ручку CII , после появления сплошного светового сектора, добиться появления узкой полоски на экране индикатора;
- з) величина измеряемой индуктивности есть произведение отсчёта CII на величину, установленную переключателем *Множитель К*;
- и) по окончании измерений выполнить пункт а).

Содержание отчёта

1. Краткие теоретические сведения с необходимыми расчётными формулами.
2. Результаты расчётов и измерений в виде таблиц.
3. Оценка проведённых исследований и полученных результатов.

Контрольные вопросы

1. Назначение катушек индуктивности и их основные параметры.
2. Как влияют конструктивные особенности катушек на их основные электрические параметры?
3. Как влияют сердечники на параметры катушек индуктивности?
4. Поясните принцип измерения индуктивности используемый в лабораторной работе.
5. Как рассчитать собственную частоту катушки индуктивности?

Используемая литература

1. Фрумкин, Г.Д. Расчёт и конструирование радиоэлектронной аппаратуры / Г.Д. Фрумкин. – М. : Высшая школа, 1985. – 233 с.
2. Фролов, А.Д. Радиодетали и узлы / А.Д. Фролов. – М. : Высшая школа, 1975. – 440 с.
3. Хоровиц, П., Хилл, У. Искусство схемотехники / П. Хоровиц, У. Хилл. – М. : Мир, 2003. – 704 с.

Лабораторная работа 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПИТАНИЯ

Цель работы: расчёт маломощного трансформатора питания и экспериментальное исследование его основных параметров.

Содержание работы

1. Расчёт трансформатора в соответствии с исходными данными (по заданию преподавателя).
2. Экспериментальное исследование основных характеристик нагруженного трансформатора и в режиме холостого хода.

Методические указания

Трансформатором называют статическое электромагнитное устройство, имеющее две или более индуктивно связанных обмоток и предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции одной (первичной) системы переменного тока в другую (вторичную) систему переменного тока.

Трансформаторы классифицируются по: количеству обмоток: двухобмоточный, трехобмоточный и многообмоточный; конструкции: стержневой, броневой; способу охлаждения: с естественным воздушным охлаждением (сухой); сухой с искусственным воздушным охлаждением (вентилятор); масляный с естественным охлаждением (погруженный в ёмкость с маслом); масляный с искусственной циркуляцией масла; применению: силовые – служат для преобразования электроэнергии в системах электроснабжения, в приборах и аппаратах; автотрансформаторы – с переменным коэффициентом трансформации; измерительные – для включения измерительных приборов в сети высокого напряжения; специальные трансформаторы – печные, сварочные, вращающиеся – трансформаторы специального назначения.

В нашем случае используется маломощный трансформатор питания.

Работа трансформатора основана на явлении электромагнитной индукции. На одну из обмоток, называемую первичной обмоткой подаётся напряжение от внешнего источника. Протекающий по первичной обмотке переменный ток создаёт переменный магнитный поток в магнитопроводе. В результате электромагнитной индукции, переменный магнитный поток в магнитопроводе создаёт во всех обмотках, в том числе и в первичной, ЭДС индукции пропорциональную первой производной магнитного потока. Когда вторичные обмотки ни к чему не подключены (режим холостого хода), ЭДС индукции в первичной обмотке практически полностью компенсирует напряжение источника питания, поэтому ток через первичную обмотку невелик, и определяется в основном её индуктивным сопротивлением.

Основными исходными данными для расчёта являются: напряжение питающей сети U_1 , В; частота питающей сети f , Гц; напряжение вторичных обмоток $U_{2,1} \dots U_{2,n}$, В; величина и тип нагрузки во вторичной цепи $R_{н1} \dots R_{нn}$, Ом.

Расчёт трансформаторов проводится в следующем порядке:

1. В зависимости от частоты питающего напряжения выбирается тот или иной тип стали сердечника и его толщина. Для частоты 50 Гц, как правило, применяют сердечники из стали Э42 толщиной 0,35 мм.

2. Определяют ток во вторичных обмотках по формуле

$$I_{2i} = U_{2i} / R_{ни}, \text{ А.} \quad (2.1)$$

3. Находят ориентировочную мощность в цепи вторичной обмотки по формуле

$$P_{2\Sigma} = \sum_{i=1}^n I_{2i} U_{2i}, \text{ Вт.} \quad (2.2)$$

4. По ориентировочной мощности находят следующие величины:

- а) допустимую величину магнитной индукции B_μ – по табл. 2.1;
- б) допустимую среднюю плотность тока $\gamma_{\text{ср}}$ – по табл. 2.1;
- в) коэффициент заполнения окна медью K_M – по табл. 2.2;
- г) коэффициент заполнения окна сталью $K_{\text{ст}}$ – по табл. 2.3.

5. Определяют необходимый магнитопровод, для чего вычисляют произведение площади сечения стали на площадь окна по формуле

$$S_{\text{ст}} S_{\text{ок}} = \frac{P_{2\Sigma} \cdot 10^6}{2,22 f B_\mu \gamma_{\text{ср}} K_M K_{\text{ст}}}, \text{ см}^4. \quad (2.3)$$

Для выбранного магнитопровода из табл. 2.3 находят значения: площадь сечения стали $S_{\text{ст}}$, см², вес магнитопровода G , кг.

6. Определяют потери в стали по формуле

$$P_{\text{ст}} = P_{\text{уд}} G, \text{ Вт,} \quad (2.4)$$

где $P_{\text{уд}}$ – удельные потери (на 1 кг стали), которые определяются по известной величине B_μ из графика, представленного на рис. 2.1.

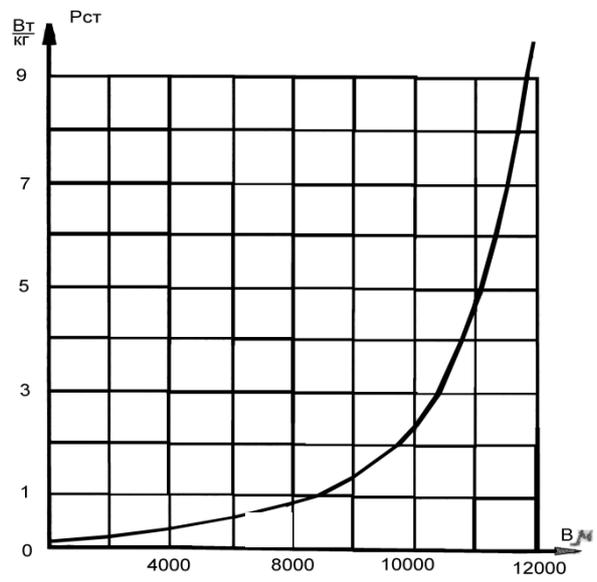


Рис. 2.1. Значения удельных потерь в магнитопроводе

2.1. Исходные данные для расчёта трансформаторов

Кoeffици- ент запол- нения окна мелю, K_m	Кoeffициент заполнения сталею, $K_{ст}$					Частота сети, Гц	Материал сердечника и его тол- щина, мм	Конфигурация магнитопровода	Индукция B , Гн	Плотность тока $\gamma_{ср}$, А/мм ²			
	0,08	0,01	0,15	0,2	0,35								
Мощность $P_{2\Sigma}$, Вт	Толщина стали, мм					50	Э42 0,35	Конфигурация магнитопровода	15...50	150...300	15...50	50...150	150...300
150-300	0,08	0,01	0,15	0,2	0,35								
0,30...0,33	0,7					400	Э44 0,2	Броневая (пластинчатая)	13 000	13 000... 13 500	5,0...3,8	3,8...1,9	1,9...1,3
0,34...0,36	–	0,7	–	0,85	0,91								
0,25...0,27	0,9					400	ХВП 0,15	Броневая (пластинчатая)	12 000	12 000... 11 500	5,5...5,0	5,0...4,0	4,0...2,8
0,28...0,30	0,87	–	0,9	0,91	0,93								
0,14...0,25	0,9					400	ХВП 0,5	Стержневая (ленточная)	16 000	16 000... 15 000	8,0...5,2	5,2...3,5	3,5...2,5
0,14...0,25	0,87	–	0,9	0,91	0,93								

2.2. Значения коэффициентов заполнения окна металлом

Кoeffици- ент запол- нения окна мелю, K_m	Кoeffициент заполнения сталею, $K_{ст}$				
	0,08	0,01	0,15	0,2	0,35
Мощность $P_{2\Sigma}$, Вт	Толщина стали, мм				
150-300	0,08	0,01	0,15	0,2	0,35
0,30...0,33	0,7				
0,34...0,36	–	0,7	–	0,85	0,91
0,25...0,27	0,9				
0,28...0,30	0,87	–	0,9	0,91	0,93
0,14...0,25	0,9				
0,14...0,25	0,87	–	0,9	0,91	0,93

где $q_{ст}$ – полная удельная намагничивающая мощность, которая определяется по известной величине B_{μ} из графика, представленного на рис. 2.2.

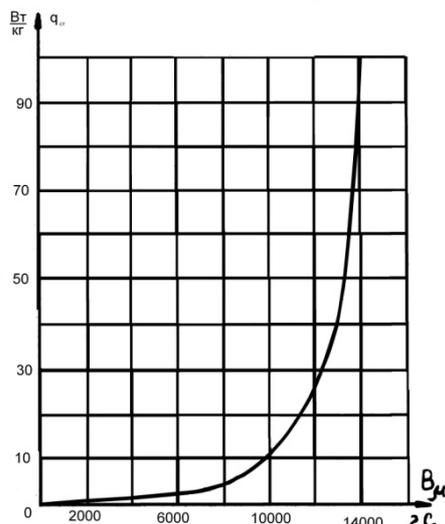


Рис. 2.2. Значение удельной намагничивающей мощности

8. Находят реактивную составляющую тока холостого хода по формуле

$$I_{0p} = \frac{Q_{ст}}{U_1}, \text{ А.} \quad (2.7)$$

9. Находят полное значение тока холостого хода по формуле

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0p}^2}. \quad (2.8)$$

10. Находят значение тока в первичной обмотке при нагруженной вторичной обмотке по формуле

$$I_1 = \frac{P_1}{U_1} = \frac{P_2}{U_2 \eta \cos \varphi}, \text{ А,} \quad (2.9)$$

где η – ориентировочное значение КПД трансформатора, который определяется из табл. 2.4 в зависимости от величины f ; ориентировочное значение $\cos \varphi$ так же находится по табл. 2.4.

11. Вычисляют число витков в обмотках:

$$W_i = \frac{E_i \cdot 10^8}{4,44 f B_{\mu} S_{ст}}, \quad (2.10)$$

где E_i – ЭДС в обмотке, вычисляется как $E_i = U_i(1 - \Delta U_i/100)$; ΔU_i – падение напряжения в обмотке, определяется по табл. 2.4 в зависимости от величины f .

12. Находят стандартные значения сечений проводов по формуле

$$S_{при} = \frac{I_i}{\gamma_{ср}}, \text{ мм.} \quad (2.11)$$

13. Выбирают стандартные значения сечений проводов и их диаметр по табл. 2.7. Кроме того, из данной таблицы берутся следующие данные: а) диаметр провода в изоляции $d_{из}$, мм; б) вес одного метра провода $q_{пр}$, г/м.

14. Находят фактическую плотность тока в обмотках по формуле

$$\gamma_i = \frac{I_i}{S_{при}}, \text{ А/мм}^2. \quad (2.12)$$

16. По табл. 2.6 находят испытательное напряжение $U_{исп}$ обмоток в зависимости от величины $U_{раб}$.

17. Вычисляют допустимую осевую длину обмотки на каркасе по формуле

$$h\gamma = h_1 - 2\Delta_{из}, \text{ мм,} \quad (2.13)$$

где h_1 – длина гильзы ($h_i = h - 1$, мм); h – высота окна магнитопровода, определяемая из табл. 2.3; $\Delta_{из}$ – толщина щётки каркаса (при мощности трансформатора < 1000 Вт применяется равной 1,5 мм).

18. Определяют число витков в слое W_i и число слоёв в каждой обмотке N_i по формуле

$$W_i = \frac{h\gamma}{K_{yi} d_{изи}}, \quad (2.14)$$

где K_{yi} – коэффициент укладки провода, определяется из табл. 2.5.

19. Находят радиальные размеры катушки. В качестве межслоевой изоляции взять для первичной обмотки кабельную бумагу К-12 толщиной 0,12 мм. Толщину обмоток можно вычислить по формуле

$$d_i = K_{yi} N_i d_{изи} + (N_i - 1) \Delta_{изи}, \text{ мм}, \quad (2.15)$$

где $\Delta_{изи}$ – толщина межслоевой изоляции.

Радиальную толщину катушки вычисляют по формуле

$$\alpha = \Delta_3 + \sum_{i=1}^{n+1} d_i + \sum_{i=1}^{n+1} h_{изи} + \alpha_{из0} + \alpha_k, \text{ мм}, \quad (2.16)$$

где Δ_3 – зазор между каркасом и сердечником (принять равной 0,5 мм); α_k – толщина каркаса (принять равной 1,5 мм); $h_{изи}$ – толщина межобмоточной изоляции (взять кабельную бумагу К-12 второго слоя); $\alpha_{из0}$ – толщина изоляции поверх крайней обмотки (взять кабельную бумагу К-12 второго слоя).

20. Определяют величину зазора между катушкой и сердечником: $\Delta = c - \alpha K_b$ (мм), где c – ширина окна, определяемая по табл. 2.3; K_b – коэффициент выпучивания, определяемый по табл. 2.7.

21. Находят потери в меди обмоток:

а) определяют среднюю длину линии витка каждой обмотки по формуле

$$l_{cpi} = 2 \cdot 10^3 (a_k + b_k + \pi r_i), \quad (2.17)$$

где для первой обмотки $r_1 = \alpha_1/2$ мм; для второй обмотки

$$r_2 = (\alpha_1 + h_{из1} + \alpha_2/2) K_2, \text{ мм}. \quad (2.18)$$

Для первой и второй обмоток $a_k = a + \eta \Delta_3 + 2\alpha_{из0} K_b$, мм; $b_k = b + 2\Delta_3 + 2\alpha_{из0} - K_b$, где a и b – размеры сердечника (табл. 2.3 и рис. 2.3);

б) находят массу меди каждой обмотки

$$G_{\mu i} = l_{cpi} W_i g_{\text{при}} \cdot 10^{-3}, \text{ кг}, \quad (2.19)$$

в) определяют потери в каждой обмотке

$$P_{\mu i} = 2,56 \gamma_i^2 G_{\mu i}, \text{ Вт}. \quad (2.20)$$

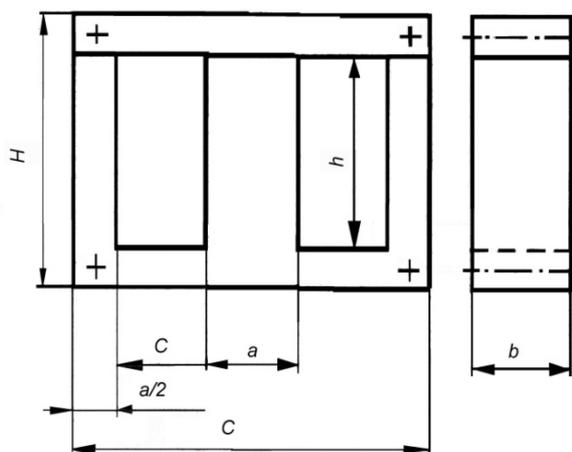


Рис. 2.3. Конфигурация магнитопровода

22. Находят суммарные потери в меди трансформатора

$$P_N = \sum_{i=1}^{n+1} P_{\mu i}. \quad (2.21)$$

23. Определяют активное сопротивление обмоток при $t = 105$ °С по формуле

$$r_i^{105} = \rho_1 l_{cpi} \frac{W_1}{S_{cpi}}, \quad (2.22)$$

где ρ_1 – удельное сопротивление меди при $t = 105$ °С, равно 2,35 Ом·мм²/м. Определяют активное сопротивление обмоток при $t = 20$ °С по формуле $r_i^{20} = r_i^{105} \frac{\rho_2}{\rho_1}$, где ρ_2 – удельное сопротивление меди при $t = 20$ °С, равно 1,75 Ом·мм²/м.

24. Определяем КПД трансформатора по формуле

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{ст} + P_{\mu}} \cdot 100 \%, \quad (2.23)$$

2.4. Значение КПД трансформаторов

Частота сети, Гц	η			Cos φ		
	Суммарная мощность $P_{2\Sigma}$, Вт			Суммарная мощность $P_{2\Sigma}$, Вт		
	15...50	50...150	150...300	15...50	50...150	150...300
50	0,5...0,8	0,9...0,8	0,9... 0,93	0,9... 0,93	0,93... 0,95	0,93... 0,95
400	0,87	0,87... 0,94	0,94... 0,96	0,84	0,94... 0,95	0,95... 0,96

Частота сети, Гц	ΔU_1			ΔU_2		
	Суммарная мощность $P_{2\Sigma}$, Вт			Суммарная мощность $P_{2\Sigma}$, Вт		
	15...50	50...150	150...300	15...50	50...150	150...300
50	15...5	5...4	4...3	20...10	10...8	8...6
400	8...4	4...1,5	1,5...1,0	10...5	5...2	2,0... 1,2

2.5. Коэффициенты укладки провода

d , мм	0,07...0,12	0,13...0,19	0,20...0,30	0,31...0,80	0,86...1,0	Свыше 1,0
K_y	1,15	1,10	1,07	1,05	1,10	1,15
K_b	1,05	1,08	1,10	1,12	1,15	1,15

2.6. Значения испытательных напряжений

Рабочее напряжение обмотки, В	Испытательное напряжение, В	
	В нормальных условиях	При повышенной влажности
До 24	250	125
24...100	500	250
100...250	1000	500

2.7. Номинальные данные обмоточных проводов

Номинальный диаметр проволоки по меди, мм	Расчётное сечение, мм ²	Вес 1 м медной проволоки, г	Максимальный диаметр, мм		
			ПЭЛ	ПЭВ	ПЭВ-2
0,03	0,000706	0,0115	0,04	—	—
0,04	0,00126	0,0144	0,05	—	—
0,05	0,000196	0,0175	0,065	—	—
0,06	0,00283	0,0251	0,075	0,085	0,09
0,07	0,00385	0,0342	0,085	0,095	0,10
0,08	0,00503	0,0447	0,095	0,105	0,11
0,09	0,00636	0,0565	0,105	0,115	0,12
0,10	0,00785	0,0698	0,12	0,125	0,13
0,11	0,00950	0,0845	0,13	0,135	0,14
0,12	0,01327	0,101	0,14	0,145	0,15
0,13	0,01539	0,108	0,15	0,155	0,16
0,14	0,01767	0,137	0,16	0,165	0,17
0,15	0,02011	0,157	0,17	0,18	0,19
0,16	0,02270	0,179	0,18	0,19	0,20
0,17	0,02545	0,202	0,19	0,20	0,21

0,18	0,02835	0,226	0,20	0,21	0,22
0,19	0,03142	0,252	0,21	0,22	0,23
0,20	0,03464	0,279	0,225	0,23	0,24
0,21	0,04155	0,308	0,235	0,24	0,25
0,22	–	–	–	–	–
0,23	0,04909	0,369	0,255	0,27	0,28
0,24	–	–	–	–	–
0,25	0,05725	0,436	0,275	0,29	0,30
0,26	–	–	–	–	–
0,27	0,06605	0,509	0,31	0,31	0,32
0,28	–	–	–	–	–
0,29	0,07548	0,587	0,33	0,33	0,34
0,30	–	–	–	–	–
0,31	0,08553	0,671	0,35	0,35	0,36
0,33	–	–	–	–	–
0,35	0,95621	0,860	0,39	0,39	0,41

Продолжение табл. 2.7

Номинальный диаметр проволоки по меди, мм	Расчётное сечение, мм ²	Вес 1 м медной прово- локи, г	Максимальный диаметр, мм		
			ПЭЛ	ПЭВ	ПЭВ-2
0,38	0,1134	1,01	0,42	0,42	0,44
0,41	0,1320	1,11	0,45	0,45	0,47
0,44	0,1521	1,35	0,48	0,48	0,50
0,47	0,1735	1,54	0,52	0,51	0,53
0,49	0,1885	1,68	0,53	0,53	0,55
0,51	0,2043	1,82	0,56	0,56	0,58
0,53	0,2206	1,96	0,58	0,58	0,60
0,55	0,2376	2,11	0,60	0,60	0,62
0,57	0,2552	2,27	0,62	0,62	0,64
0,59	0,2734	2,433	0,64	0,64	0,66
0,62	0,3019	2,68	0,67	0,67	0,69
0,64	0,3217	2,86	0,69	0,69	0,72
0,67	0,3526	3,13	0,72	0,72	0,75
0,69	0,3739	3,32	0,74	0,74	0,77
0,72	0,4072	3,60	0,78	0,77	0,80
0,74	0,4301	3,82	0,80	0,80	0,83
0,77	0,5027	4,14	0,83	0,83	0,86
0,80	0,5411	4,47	0,86	0,86	0,89
0,83	0,5809	4,81	0,89	0,89	0,92
0,86	0,6362	5,16	0,92	0,92	0,95
0,90	0,6793	5,66	0,96	0,99	0,99
0,93	0,7238	6,04	0,99	0,89	1,02
1,00	0,7854	6,44	1,07	1,08	1,11
1,04	0,8495	6,98	1,12	1,12	1,15
1,08	0,9161	7,55	1,16	1,16	1,19
1,12	0,9852	8,14	1,20	1,20	1,23
1,16	1,0568	8,76	1,24	1,24	1,27
1,20	1,1310	10,10	1,28	1,28	1,31
1,25	1,2272	10,90	1,33	1,33	1,36
1,30	1,327	11,80	1,38	1,38	1,41
1,35	1,4314	12,70	1,43	1,43	1,46

Продолжение табл. 2.7

Номинальный диаметр проволоки по меди, мм	Расчётное сечение, мм ²	Вес 1 м медной прово- локи, г	Максимальный диаметр, мм		
			ПЭЛ	ПЭВ	ПЭВ-2

1,40	1,5394	13,70	1,48	1,48	1,51
1,45	1,6513	14,70	1,53	1,53	1,56
1,50	1,7672	15,70	1,58	1,58	1,61
1,56	1,9113	17,00	1,64	1,64	1,67
1,62	2,0612	18,30	1,71	1,70	1,73
1,68	2,217	19,7	1,77	1,76	1,79
1,74	2,378	21,10	1,83	1,82	1,85
1,81	2,5730	22,9	1,90	1,90	1,93
1,88	2,776	24,7	1,97	1,97	2,00
1,95	2,987	26,5	2,04	2,04	2,07
2,02	3,205	28,5	2,12	2,11	2,14
2,10	3,464	30,80	2,20	2,20	2,23
2,26	4,012	35,7	2,36	2,36	2,39
2,44	4,676	41,6	2,54	2,54	2,57
2,63	5,433	—	—	—	—
2,83	6,280	—	—	—	—
3,05	7,306	—	—	—	—
3,28	8,450	—	—	—	—
3,53	9,787	—	—	—	—
3,80	11,34	—	—	—	—
4,10	13,20	—	—	—	—
4,50	15,90	—	—	—	—
4,80	18,10	—	—	—	—
5,20	21,24	—	—	—	—

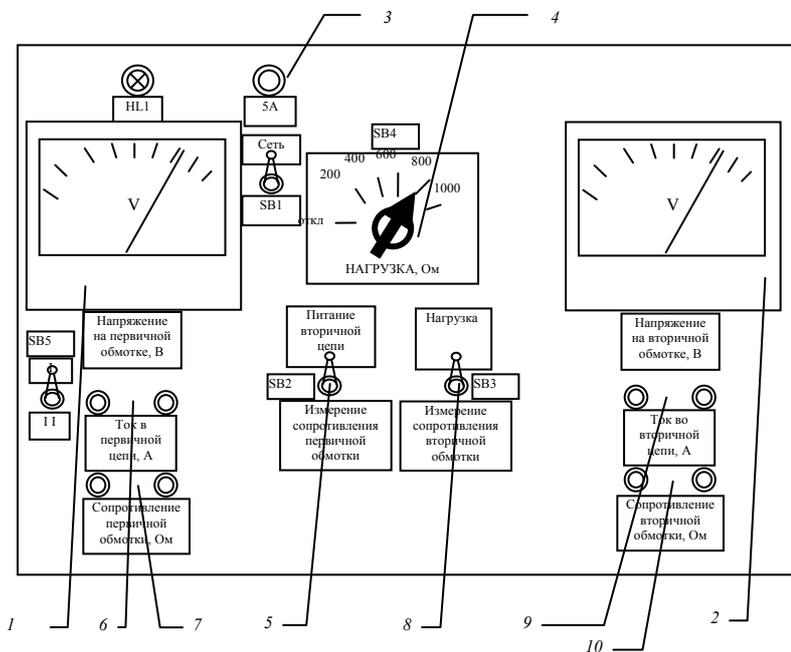


Рис. 2.4. Лицевая панель и органы управления лабораторного стенда:
 1 – вольтметр (напряжение первичной обмотки, В); 2 – вольтметр (напряжение вторичной обмотки, В); 3 – предохранитель (5,0 А); 4 – SB4 – ручка переключения нагрузки; 5 – тумблер SB2 – (питание/измерение сопротивления) первичной обмотки; 6 – Клеммы подключения амперметра в цепь первичной обмотки; 7 – Клеммы подключения омметра в цепь первичной обмотки; 8 – тумблер SB3 – (нагрузка/измерение сопротивления)

вторичной обмотки; 9 – клеммы подключения амперметра в цепь вторичной обмотки; 10 – клеммы подключения омметра в цепь вторичной обмотки;

11 – тумблер SB5 – переключение клемм для измерения тока в первичной/вторичной цепях; 12 – HL1 – индикатор питания от сети переменного напряжения 220 В

Пр и м е ч а н и я : 1) при измерении сопротивления обмоток трансформатора, необходимо отключить питание вторичной цепи!
2) при измерении токов в цепи тумблер SB5 необходимо переключать в соответствующее положение для корректного измерения тока.

Порядок выполнения работы

- Используя методические указания и формулы, рассчитать предложенный трансформатор.
- Переключить тумблер SB2 (рис. 2.3) в положение «Измерение сопротивления первичной обмотки», тумблер SB3 в положение «Измерение сопротивления вторичной обмотки», и измерить сопротивления первичной и вторичной обмоток на клеммах (7) и (10) соответственно.
- Включить питание лабораторного стенда переключателем SB1. Тумблер SB2 переключить в положение «Питание вторичной цепи», тумблер SB3 в положение «Нагрузка», переключатель SB4 в положение «Откл.», тумблер SB5 в положение I и измерить ток холостого хода в первичной обмотке на клеммах (6), а так же зафиксировать напряжение вторичной обмотки (индикатор (2)).
- Рассчитать коэффициент трансформации по формуле $K_{тр} = \frac{|U_{xx2}|}{|U_{xx1}|} = \frac{n_2}{n_1}$, где n_1 и n_2 – число витков на первичной и вторичной обмотках трансформатора соответственно (рис. 2.4).
- Подключить нагрузку ко вторичной цепи трансформатора переключателем SB4, тумблер SB5 поставить в указанное положение.

Снять следующие зависимости и построить графики:

- зависимость тока первичной обмотки от величины нагрузки (SB5 в положение I);
- зависимость тока вторичной обмотки от величины нагрузки (SB5 в положение II);

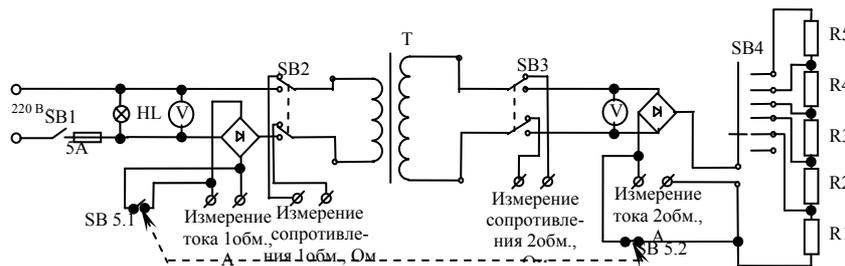


Рис. 2.5. Лабораторный стенд. Схема электрическая принципиальная

- зависимость напряжения вторичной обмотки от сопротивления нагрузки (при этом тумблер SB5 поставить в положение I).
- Рассчитать зависимость КПД трансформатора от величины нагрузки (23).
- Через 1,5 часа работы трансформатора измерить сопротивление обмоток и рассчитать величину перегрева трансформатора по формуле:

$$\Delta t = (R_t - R_u) T K E R_u,$$

где R_u – сопротивление обмотки до включения трансформатора; R_t – сопротивление обмотки через 1,5 часа работы; TKE – температурный коэффициент меди, равный 0,04.

Содержание отчета

- Результаты расчетов основных характеристик предложенного трансформатора.
- Результаты исследования трансформатора в виде таблиц и графиков.

Контрольные вопросы

- Схема замещения трансформатора.
- Основные и паразитные характеристики трансформатора.
- Характеристика потерь в реальном трансформаторе.
- Типы магнитопроводов и их характеристика.

Используемая литература

1. Резисторы. Конденсаторы. Трансформаторы. Дроссели. Коммутационные устройства РЭА : справочник. – Минск : Беларусь, 1994. – 590 с.

2. Китаев, В.Е. Расчёт источников электропитания устройств связи : учеб. пособ. для вузов / В.Е. Китаев, А.А. Бокуняев, М.Ф. Колканов. – М. – Л. : Энергия, 1966. – 105 с.

Лабораторная работа 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ФИЛЬТРА

Цель работы: изучить устройство и принцип работы пьезофильтра; овладеть методикой определения рабочей частоты пьезофильтра.

Общие сведения

Фильтры – это элементы, обладающие избирательными свойствами по отношению к сигналам разных частот. Фильтры в РЭА находят широкое распространение, выполняются с использованием различных принципов действия и с различными характеристиками. На основе физической сущности процессов фильтры делятся на электрические, в которых используются электрические элементы, и на механические (точнее электромеханические), в которых используются механические элементы. В электромеханических фильтрах фильтрация осуществляется в механических резонаторах, т.е. фильтрующими свойствами обладает не электрическая цепь, а совокупность механических резонаторов. Большие возможности в этом смысле дают такие принципы преобразования электрических колебаний в механические или такие принципы связей элементов электрических цепей с механическими резонаторами, при которых активные потери при преобразовании оказываются малыми.

Таковыми особенностями обладают преобразователи, в которых за счёт пьезоэффекта происходит возбуждение упругих механических колебаний. В этих преобразователях получается своеобразный конденсатор, к обкладкам которого подаётся напряжение переменного тока, и промежуток между обкладками заполнен материалом с пьезоэлектрическими свойствами.

Пьезоэлектрики представляют собой кристаллические вещества, в которых при сжатии или растяжении в определённых направлениях возникает электрическая поляризация даже в отсутствии электрического поля (прямой пьезоэффект). Следствием прямого пьезоэффекта является обратный пьезоэффект – появление механической деформации под действием электрического поля. Связь между механическими и электрическими параметрами (деформацией и электрическим полем) носит в обоих случаях линейный характер.

Пьезоэффекты наблюдаются только в кристаллах, не имеющих центра симметрии.

Пьезоэлектрический фильтр представляет собой кристалл пьезоэлектрика, упругие колебания которого могут быть вызваны приложением электрического поля, и эти колебания в свою очередь генерируют напряжение на гранях кристалла.

Конструктивное устройство фильтра показано на рис. 3.1.

У поверхности пьезокристалла 1 размещены металлические пластины 2, выполняемые, как правило, методом замыкания, которые подключены к выводам 3. Вся конструкция размещается в герметичном корпусе 4, который может быть выполнен из металла или стекла.

Современные пьезофильтры выпускаются в различных конструктивных исполнениях: со штекерными выводами, для установки в специальные разъёмы, с гибкими выводами для монтажа в печатные платы и в виде безвыводных элементов поверхностного монтажа.

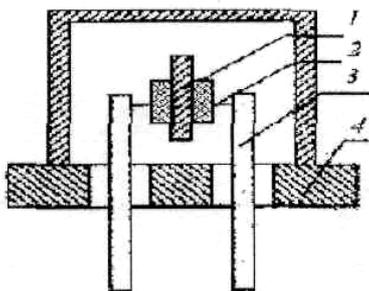


Рис. 3.1. Конструкция пьезоэлектрического фильтра

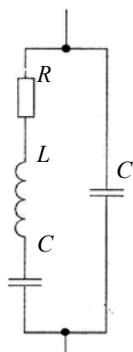


Рис. 3.2. Эквивалентная электрическая схема пьезоэлектрического фильтра

На рис. 3.2 приведена эквивалентная электрическая схема пьезоэлектрического фильтра.

В схемах с пьезоэлектрическими фильтрами, как и в LC-генераторах, вводят положительную обратную связь и обеспечивают надлежащее усиление на резонансной частоте, что приводит к возникновению автоколебаний. Пьезоэлектрические фильтры выпускают на диапазон частот 10...250 МГц, что позволяет широко применять их в самых разнообразных радиоэлектронных схемах. На рис. 3.3 приведена схема генератора Вина, для лабораторного стенда.

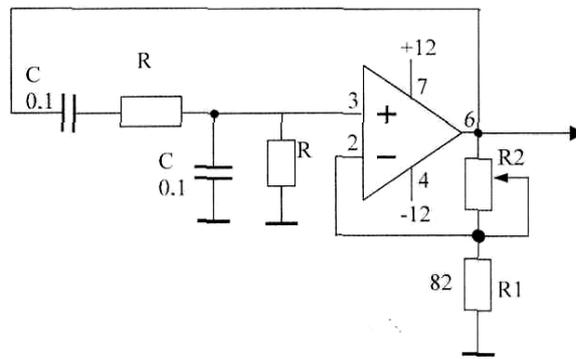


Рис. 3.3. Принципиальная электрическая схема генератора

Порядок выполнения работы

1. Подключить к лабораторному стенду измерительные приборы: к выходу генератора – частотомер, к выходу фильтра – осциллограф.
2. Подключить к клеммам стенда питание.
3. Плавно увеличивая R_2 , добейтесь возникновения колебаний на выходе генератора.
4. Плавно изменяя частоту генератора переменным резистором R , зафиксируйте на экране осциллографа момент резонанса. Определить резонансную частоту по показаниям частотомера, занести результат в отчёт.
5. Отключить от стенда питание и измерительные приборы.
6. Построить резонансную кривую $U = f(F)$ пьезофильтра при перестройке частоты генератора в диапазоне, указанном в таблице. Показания частоты снимать по частотомеру, амплитуду сигнала – по осциллографу. Занести результаты измерений в табл. 3.1.

3.1. Экспериментальные значения напряжений

F , Гц	16 500	16 700	16 850	17 000	17 150	17 300	17 450	17 600	17 750	17 900	18 000
U , В											

Содержание отчёта

Рабочая частота и резонансная кривая исследуемого пьезофильтра, таблица с результатами измерений.

Контрольные вопросы

1. Принцип работы пьезоэлектриков.
2. Конструкция пьезоэлектрического фильтра.
3. Параметры и схема замещения пьезоэлектрического фильтра.
4. Особенности применения пьезоэлектрического фильтра в схемах генераторов.

Используемая литература

1. Чернышова, Т.И. Электронные компоненты РЭС / Т.И. Чернышова, Н.Г. Чернышов. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005.
2. Рычина, Т.А. Электрорадиоэлементы / Т.А. Рычина. – М. : Сов. радио, 1976.

Лабораторная работа 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КОНДЕНСАТОРОВ ПОСТОЯННОЙ ЁМКОСТИ

Цель работы: ознакомление с различными видами конденсаторов постоянной ёмкости, в том числе электролитическими. Исследование температурной стабильности ёмкости и тока утечки конденсаторов.

Основные сведения

Конденсатор как следует из его названия, предназначен для «конденсирования» (накопления) электрического заряда. Любые два проводника, разделённые диэлектриком, образуют конденсатор. Условные обозначения конденсаторов в зависимости от материала диэлектрика показаны в прим. 4. Заряд конденсатора Q и накопленная в нём энергия W связаны с напряжением U на его электродах и его ёмкостью C известными выражениями:

$$Q = CU; \quad W = CU^2 / 2.$$

При расчётах в системе СИ ёмкость конденсатора выражают в фарадах (Ф). Реальные конденсаторы обычно имеют ёмкость, составляющую миллиардные, миллионные или тысячные доли фарады. Поэтому для маркировки их ёмкости используются производные единицы: пикофарады ($1 \text{ пФ} = 10^{-12} \text{ Ф}$), нанофарады ($1 \text{ нФ} = 1000 \text{ пФ} = 10^{-9} \text{ Ф}$) и микрофарады ($1 \text{ мкФ} = 1000 \text{ нФ} = 10^{-6} \text{ Ф}$). Наиболее часто ёмкость указывают на корпусе конденсатора в явном виде, например: 510 пФ; 15 нФ; 0,022 мкФ; 100 мкФ. На зарубежных конденсаторах эти же номинальные значения имеют следующую маркировку: 510 pF; 15 nF; 0,022 μF; 100 μF. На микроминиатюрных конденсаторах принято не указывать единиц измерения; их ёмкость всегда выражают в пикофарадах числовым кодом, в котором первые две цифры являются значащими, а последняя цифра указывает степень N множителя 10^N . Например, маркировка «102» на корпусе конденсатора означает ёмкость $10 \cdot 10^2 \text{ пФ} = 1000 \text{ пФ}$, а «223» означает $22 \cdot 10^3 \text{ пФ} = 22000 \text{ пФ} = 22 \text{ нФ}$ или 0,022 мкФ.

Допустимые отклонения ёмкости конденсатора от номинального значения (прил. 3) обычно связаны с температурными нестабильностями в диапазоне рабочих температур. На плёночных, бумажных и электролитических конденсаторах допуск приводится в маркировке и указывается в процентах, например $\pm 5\%$; $\pm 10\%$; $\pm 20\%$.

Конденсаторы с керамической изоляцией обладают, как правило, тем большим допуском номинального значения, чем выше их номинальная ёмкость. Здесь принято два вида обозначений допуска. Для конденсаторов с предсказуемой монотонно изменяющейся зависимостью ёмкости от температуры, т.е. с известным значением температурного коэффициента ёмкости (ТКЕ), введены группы термостабильности, указываемые на корпусе конденсатора вместе с его номинальной ёмкостью, табл. 4.1.

Для этой группы конденсаторов во всём диапазоне рабочих температур с определённым допуском, достигающим $\pm 20 \dots 100\%$ от объявленной величины, ТКЕ может быть задан как постоянная величина, рассчитываемая по известной формуле:

$$\alpha_C = \text{ТКЕ} = \frac{1}{C} \frac{dC}{dT} = \frac{1}{C} \frac{\Delta C}{\Delta T}. \quad (4.1)$$

4.1. Группы термостабильности керамических конденсаторов с постоянным ТКЕ

Относительное изменение ёмкости (ppm/°C)	+100	+33	0	-47	-75	-150	-750	-1500
Отечественное обозначение группы ТКЕ	П100	П33	МП0	М47	М75	М150	М750	М1500
Буквенный код ТКЕ (зарубежные конденсаторы, нормы CIE)	A	B	G	H(-33)	L	P	U	-

Обозначение группы термостабильности конденсаторов отечественного производства, у которых в пределах рабочих температур изменение ёмкости не имеет монотонного характера (ТКЕ сначала может расти, а затем падать, или наоборот), начинается с русской буквы Н. Вслед за буквой Н указывается двухзначное число, обозначающее допуск (в процентах) изменения ёмкости, табл. 4.2.

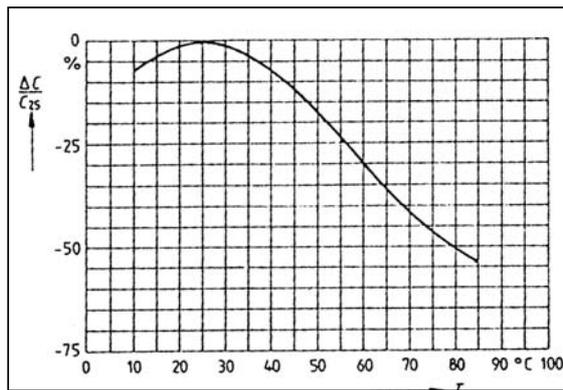
4.2. Группы термостабильности керамических конденсаторов с неопределённым ТКЕ

Относительное изменение ёмкости $\Delta C/C$, %	± 10	± 20	± 30	± 50	± 70	Более ± 70
Отечественное обозначение группы допуска	Н10	Н20	Н30	Н50	Н70	Н90
Зарубежное обозначение группы допуска (нормы CIE)	2B	2C	2D (+20... 30 %)	2E (+20... 55 %)	-	2F (+30... 80 %)

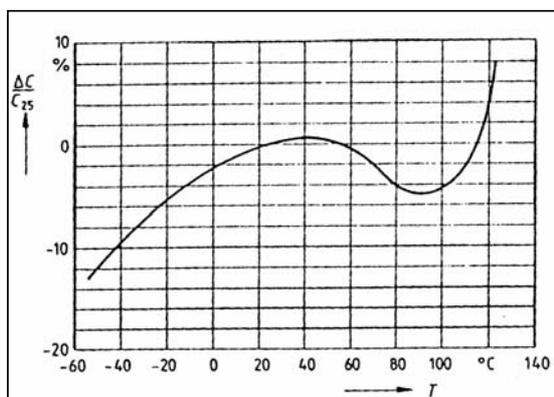
Примечание. Цифра 2 перед буквами B, C, D и т.д. указывает на принадлежность конденсаторной керамики к категории с неопределённым ТКЕ (категория 2).

На рис. 4.1 изображена температурная зависимость ТКЕ для наиболее распространённых типов конденсаторных керамик Y5V (применяется в конденсаторах ёмкостью от 1000 пФ до 10 нФ) и X7R (1...300 нФ).

Температура оказывает влияние не только на значение ёмкости конденсатора, но и на его ток утечки, характеризующий электрическую прочность изоляции. Температурное изменение тока утечки особенно велико у электролитических конденсаторов. Для электролитических



Керамика Z5U (Y5V)



Керамика X7R

Рис. 4.1. Зависимость ТКЕ от температуры для различных типов керамики

конденсаторов с алюминиевыми электродами максимальный ток утечки $I_{ут}$ (мкА) в рабочем диапазоне температур (обычно – 40...+85 °С) вычисляется по следующей эмпирической формуле:

$$I_{ут} \leq 0,01CU \text{ (для } CU \leq 1000)$$

или

$$I_{ут} \leq 0,03CU \text{ (для } CU > 1000), \quad (4.2)$$

где C выражена в мкФ, а U – в вольтах.

Как известно, зависимости тока и напряжения на конденсаторе во время переходных процессов в RC -цепях с источниками постоянного напряжения описываются экспоненциальной функцией. Общее решение дифференциального уравнения для цепи зарядки/разрядки конденсатора C через резистор R даёт следующую зависимость напряжения на конденсаторе $U(t)$ от текущего времени t :

$$U(t) = U_{\infty} - (U_{\infty} - U_0) \cdot \exp(-t/\tau), \quad (4.3)$$

где U_{∞} – напряжение на конденсаторе после окончания переходного процесса, т.е. для времени $t = \infty$; U_0 – напряжение на конденсаторе в момент начала переходного процесса, т.е. для $t = 0$; $\tau = RC$ – постоянная времени цепи зарядки/разрядки.

Если конденсатор изначально не заряжен, т.е. $U_0 = 0$, а к моменту полной зарядки (при $t = \infty$) напряжение на нём становится равным напряжению источника питания, т.е. $U_{\infty} = U_{п}$, то формула (4.3) приводится к следующему известному виду:

$$U(t) = U_{п} [1 - \exp(-t/\tau)]. \quad (4.4)$$

Напротив, если в начале переходного процесса ($t = 0$) конденсатор был заряжен до напряжения U_0 , а к концу переходного процесса он разряжается до нуля, т.е. $U_{\infty} = 0$, то формула (4.3) приводится к другому известному виду:

$$U(t) = U_0 \exp(-t/\tau). \quad (4.5)$$

В настоящей лабораторной работе предоставляется возможность проверить на практике справедливость выражений (4.4) и (4.5).

Порядок выполнения работы

Исследование ТКЕ конденсаторов. В лабораторной работе исследуется температурная зависимость ёмкости двух конденсаторов с керамической изоляцией: многослойный с однонаправленными выводами и керамикой типа Y5V и многослой-

ный планарный конденсатор с керамикой X7R. Рабочий диапазон температур первого конденсатора $-25...+85$ °С, второго – $55...+125$ °С. Для проведения исследований собирается схема, изображенная на рис. 4.2.

Сначала измеряется ёмкость конденсаторов при комнатной температуре, а затем производится постепенный нагрев конденсаторов до максимальной рабочей температуры с одновременным измерением ёмкости. По результатам измерений заполняется табл. 4.3.

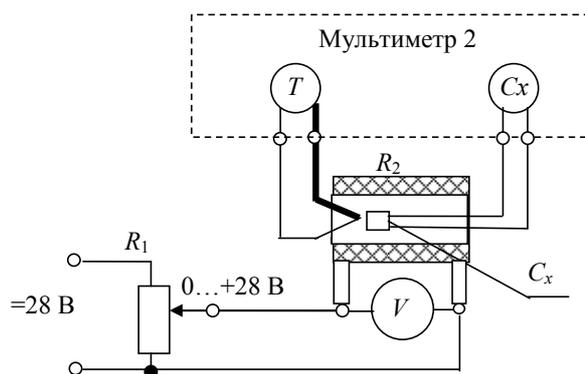


Рис. 4.2. Схема проведения измерений ТКЕ керамических конденсаторов

4.3. Экспериментальные значения

Температура T , °С						
Ёмкость конденсатора с керамикой Y5V, нФ						
Температурный коэффициент ёмкости α_C конденсатора с керамикой Y5V, ppm/°С						
Ёмкость конденсатора с керамикой X7R, нФ						
Температурный коэффициент ёмкости α_C конденсатора с керамикой X7R, ppm/°С						

Значения α_C рассчитываются по данным соседних столбцов таблицы с помощью формулы (4.1). По результатам эксперимента строятся зависимости ёмкости конденсаторов и ТКЕ от температуры и должен быть сделан вывод о принадлежности исследованных конденсаторов к какой-либо из нормализованных групп термостабильности (см. табл. 4.1 и 4.2).

Исследование температурной зависимости тока утечки электролитического конденсатора с алюминиевыми электродами. В лабораторной работе исследуется температурная зависимость тока утечки алюминиевого электролитического конденсатора с номинальной ёмкостью 100 мкФ, с максимальным напряжением 50 В и диапазоном рабочих температур $-25...+85$ °С. Для измерения тока утечки конденсатора используется стабилизированное напряжение +18 В. Ток утечки измеряется с помощью мультиметра 1 по падению напряжения на балластном резисторе R_6 сопротивлением около 1 МОм, включённом в цепь зарядки конденсатора (рис. 4.3). Такой способ измерения тока вызван отсутствием в применяемых мультиметрах пределов измерения токов, рассчитанных на единицы мкА. После сборки схемы необходимо зарядить исследуемый конденсатор до напряжения источника питания, замкнув накоротко балластный резистор при помощи перемычки на 5 – 10 с. Перед началом измерений нужно также измерить сопротивление балластного резистора R_6 . В процессе эксперимента необходимо измерять падение

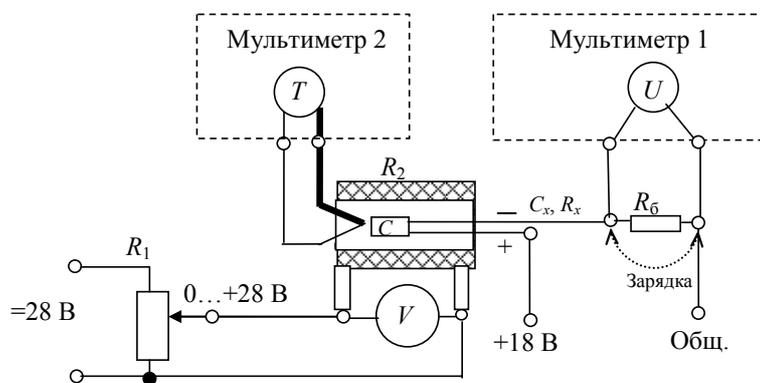


Рис. 4.3. Схема измерений температурной зависимости тока утечки алюминиевого электролитического конденсатора

напряжения на балластном резисторе и пересчитывать его в ток с помощью закона Ома. При подключении конденсатора C к зажимам « C_x, R_x » следует помнить, что электролитический конденсатор является полярным и важно, чтобы положительный полюс конденсатора (+) подключался к положительному полюсу источника питания.

По результатам исследований заполняется табл. 4.4 и строится зависимость тока утечки конденсатора от температуры.

4.4. Зависимость тока утечки конденсатора от температуры

Температура $T, ^\circ\text{C}$						
Падение напряжения на балластном резисторе, мВ						
Ток утечки, мкА (рассчитать)						

Сравните полученные значения тока утечки со значениями, вычисляемыми по эмпирической формуле (4.2).

Исследование процесса зарядки конденсатора. В лабораторной работе исследуется зависимость от времени напряжения на конденсаторе в процессе его зарядки. Параметры конденсатора: ёмкость 1000 мкФ, максимальное напряжение 25 В. В качестве источника питания используется выход стабилизированного источника напряжения +18 В. В цепь зарядки конденсатора включается ограничительный резистор R_C сопротивлением 30...70 кОм (рис. 4.3).

Перед началом эксперимента необходимо измерить сопротивление ограничительного резистора R_C , а также разрядить конденсатор, замкнув его выводы накоротко на несколько секунд.

Соберите схему, изображенную на рис. 4.4. При сборке обратите внимание на правильность подключения полярного конденсатора. Приготовьте секундомер и включите питание стенда. Через каждые 15 с записывайте показания вольтметра.

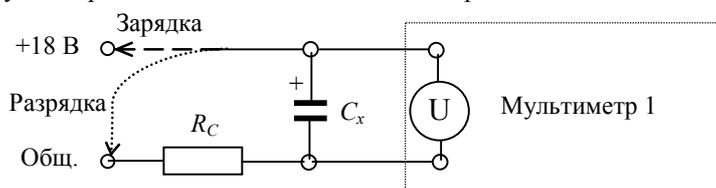


Рис. 4.4. Схема исследования процессов зарядки и разрядки конденсатора

Для исследования процесса разрядки конденсатора приготовьте секундомер, отключите положительный полюс конденсатора от источника напряжения и замкните его на общую точку (см. рис. 4.4). Через каждые 15 с записывайте показания вольтметра до тех пор, пока конденсатор не разрядится.

Постройте зависимости $U_C = f(t)$ для процессов зарядки и разрядки конденсатора. Сравните полученные экспериментальные зависимости с расчётными, построенными по формулам (4.4), (4.5).

Содержание отчёта

1. Схемы измерений параметров конденсаторов
2. Заполненные табл. 4.3, 4.4 и таблицы снятия временной зависимости зарядки и разрядки конденсатора.

3. Графики температурных зависимостей ёмкости и тока утечки исследованных конденсаторов.
4. Графики расчётной и экспериментальной зависимостей изменения напряжения на конденсаторе при его зарядке и разрядке.
5. Выводы по результатам исследований.

Контрольные вопросы

1. Что такое конденсатор?
2. Что такое ТКЕ и от чего он зависит?
3. Термостабильность конденсаторов.

Используемая литература

1. Конденсаторы : справочник / под ред. И.И. Четверткова и В.Н. Дьяконова. – М. : Радио и связь, 1991.

Лабораторная работа 5

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КОНДЕНСАТОРОВ ПЕРЕМЕННОЙ ЁМКОСТИ (ВАРИКАПОВ)

Цель работы: теоретическое и экспериментальное исследование электрических параметров варикапов; овладение методикой измерения основных электрических параметров варикапов.

Общие сведения

Варикапами называют полупроводниковые диоды, в которых используется барьерная ёмкость запертого $p-n$ -перехода, зависящая от величины приложенного к диоду обратного напряжения.

Конструктивно устройство варикапа представлено на рис. 5.1. В кристалл кремния 5 с одной его стороны вдавлен в вакууме алюминиевый столбик 4 для получения $p-n$ -перехода, а с другой стороны – сплав золото–сурьма для получения омического контакта 6. Эта структура вплавляется в вакууме в золоченный кристаллодержатель 7. К алюминиевому столбику прикреплён внутренний вывод 2. Соединение кристаллодержателя с баллоном 3 и выводом 1 осуществляется сплавлением в водороде.

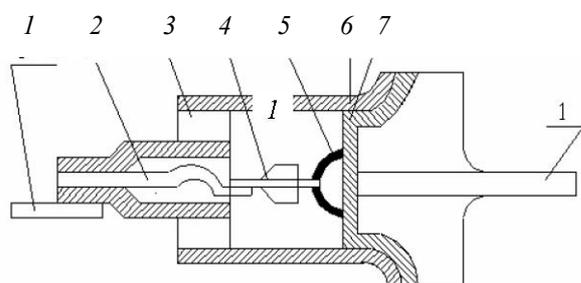


Рис. 5.1. Конструкция варикапа

Для проявления у варикапа ёмкостных свойств к нему необходимо подвести обратное напряжение. Как известно, при отсутствии внешнего напряжения между областями существует контактная разность потенциалов (потенциальный барьер) и внутреннее электрическое поле.

Если к диоду приложить обратное напряжение $U_{обр}$ (рис. 5.2), то высота потенциального барьера между p - и n -областями возрастает на величину приложенного напряжения, возрастает и напряжённость электрического поля в $p-n$ -переходе. Внешнее обратное напряжение отталкивает электроны глубже внутрь n -области, а дырки – внутрь p -области. В результате происходит расширение области $p-n$ -перехода и тем больше, чем выше напряжение $U_{обр}$. Таким образом, изменение обратного напряжения, приложенного к $p-n$ -переходу приводит к изменению барьерной ёмкости диода C_b , которая может быть определена из формулы

$$C_b = \epsilon \epsilon_0 S / 4\pi d, \quad (5.1)$$

где ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника, Ф/м; S – площадь $p-n$ -перехода, мкм; ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, Ф/м.

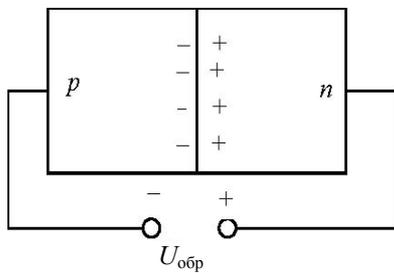


Рис. 5.2. Принцип формирования барьерной ёмкости

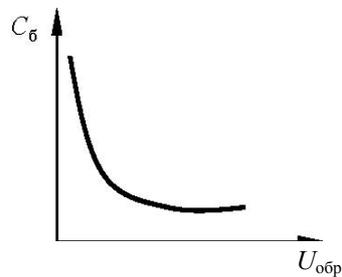


Рис. 5.3. Вольт-фарадная характеристика варикапа

Ширина p - n -перехода зависит от величины приложенного напряжения, следовательно, барьерная ёмкость зависит от напряжения: при возрастании запирающего напряжения ширина p - n -перехода увеличивается, а его барьерная ёмкость уменьшается (рис. 5.3).

Области пространственного заряда варикапов разделяются на два вида: а) резкий переход, т.е. ступенчатое изменение концентрации примесей; б) плавный переход. Ширина области резких переходов определяется по формуле

$$d = \sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0(U + \varphi_k)}{2\pi eN}}, \quad (5.2)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость материала (полупроводника), равная 10^4 Ф/м; ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума; e – заряд электрона, равный $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл; U – величина приложенного напряжения, В; φ_k – контактная разность потенциалов, В (десятые доли вольта); N – концентрация примесей, равная $3 \cdot 10^{21}$ м $^{-3}$.

При этом барьерная ёмкость

$$C_б = S \sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0 e N}{2\pi(U + \varphi_k)}}. \quad (5.3)$$

Для плавных переходов ширина области пространственного заряда определяется выражением

$$d = \sqrt{\frac{3\varepsilon\varepsilon_0(U + \varphi_k)}{\pi e a}}, \quad (5.4)$$

где a – градиент примеси, вычисленный по формуле $a \approx N/l$; l – глубина области изменения концентрации, мкм.

Соответственно, барьерная ёмкость

$$C_б = S \sqrt{\frac{(\varepsilon\varepsilon_0)^2 e a}{192\pi^2(U + \varphi_k)}}. \quad (5.5)$$

Коэффициент перекрытия по ёмкости определяется отношением максимальной ёмкости варикапа C_{\max} к минимальной:

$$K_c = C_{\max}/C_{\min}. \quad (5.6)$$

Методические указания

Для измерения ёмкости варикапа применяется автогенераторный метод. Исследуемый варикап подключается параллельно к колебательному контуру автогенератора, изменение частоты которого соответствует изменению ёмкости варикапа.

Для измерения ёмкости варикапа на лабораторном стенде собирается схема, представленная на рис. 5.4; здесь E , E_1 – источники питания варикапа и автогенератора, соответственно; f – частотомер.

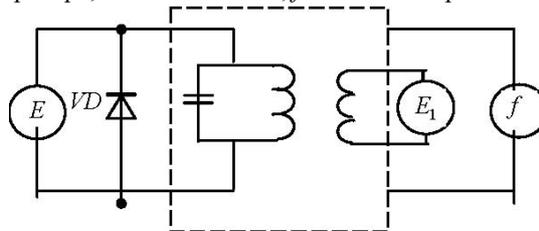


Рис. 5.4. Схема лабораторной установки

Измерения параметров варикапа производятся в следующей последовательности.

1. Отключить варикап и измерить собственную частоту автогенератора f_0 .

2. Вместо варикапа подключить калибровочную ёмкость C_k и измерить калибровочную частоту автогенератора f_k .
3. Подключить варикап и источник питания E_1 и снять зависимость частоты автогенератора от напряжения на варикапе, $f = F_1(U)$, $U = 0, \dots, 20$ В, изменяя напряжение на варикапе с шагом 2 В. По данным, полученным в предыдущих пунктах, рассчитать вольт-фарадную характеристику варикапа. Результаты расчётов C_6 занести в табл. 5.2.

Барьерная ёмкость рассчитывается по выражению

$$C_6 = (f_0^2 / f^2 + 1)^2 C_k / f_0^2 / f_k^2 + 1.$$

4. По экспериментальным данным построить график вольт-фарадной характеристики варикапа $C_6 = F_2(U)$.
5. По экспериментальным данным рассчитать коэффициент перекрытия данного варикапа в соответствии с выражением (5.6).

5.2. Результаты расчётов

U , В	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
f , Гц											
C_6 , пФ											

Порядок выполнения работы

1. Рассчитать барьерные ёмкости для плавных и резких $p-n$ -переходов по формулам (5.3) и (5.5) при $U = 0 \dots 20$ В, с шагом 2 В. $\varphi_k = 0,1; 0,5; 0,7$, В; $N = 3 \cdot 10^{21}; 3 \cdot 10^{20}; 4 \cdot 10^{20}$, м⁻³; $l = 1; 1,1; 1,3; 1,5$, мкм.
2. Результаты проведённых расчётов свести в табл. 5.1.

5.1. Экспериментальные значения

U , В	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
C_6 для резких переходов, пФ											
C_6 для плавных переходов, пФ											

3. Определить коэффициенты перекрытия варикапов с резкими и плавными переходами по выражению (6). Построить графики зависимостей барьерной ёмкости от приложенного напряжения $C_6 = f(U)$ для резких и плавных переходов.

Содержание отчёта

1. Результаты расчётов C_6 для резких и плавных переходов варикапов.
2. Графики вольт-фарадных характеристик для расчётной и экспериментальной частей.

Контрольные вопросы

1. Принцип изменения ёмкости варикапа.
2. Конструкция варикапа.
3. Эквивалентная схема варикапа.
4. Параметры варикапа.
5. Особенности применения варикапов в качестве конденсаторов переменной ёмкости.

Используемая литература

1. Конденсаторы : справочник / под ред. И.И. Четверткова и В.Н. Дьяконова. – М. : Радио и связь, 1991.

Лабораторная работа 6

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГЕРКОНОВ

Цель работы: исследование основных параметров герконов; овладение методикой измерения статических и динамических параметров герконов.

Общие сведения

Герконы (герметизированные контакты) относятся к группе контактных устройств. Они представляют собой цилиндрическую стеклянную колбу с впаянными в неё двумя или тремя контактами. Контакты изготавливаются из магнитомягкого

сплава в виде плоских лепестков, свободные концы которых внутри колбы отстают друг от друга на расстоянии 30...150 мкм. Принцип работы геркона заключается в намагничивании контактов внешним магнитным полем и их взаимном притяжении. Внешнее магнитное поле (управляющее) можно создавать как постоянным магнитом, так и с помощью электромагнитов (герконовые реле). Так как коммутируемый герконом ток значителен, то для снижения переходного сопротивления контактов и предотвращения их залипания соприкасающиеся поверхности контактов покрывают серебром, золотом и другими благородными металлами. Для уменьшения при размыкании контактов образующейся между ними искры, стеклянную колбу заполняют инертным газом или в ней создают разряжение.

Промышленность выпускает герконы с нормально разомкнутыми, нормально замкнутыми, переключающимися контактами. Характеристиками герконов являются высокое сопротивление изоляции (более 10^9 Ом), большой срок службы (до 10^8 срабатываний), малое переходное сопротивление (0,05...0,2 Ом), большой диапазон температур (-60...+150 °С), возможность коммутации цепей с малыми токами (единицы мкА) и частотой до 100 МГц. Важнейшими параметрами геркона считают предельную частоту коммутации и магнитодвижущую силу срабатывания (в ампервитках). Эти параметры для каждого типа герконов определяют из справочных таблиц.

Описание лабораторного стенда и принципиальной схемы. На лицевую панель лабораторного стенда (рис. 6.1) выведены ручки управ-

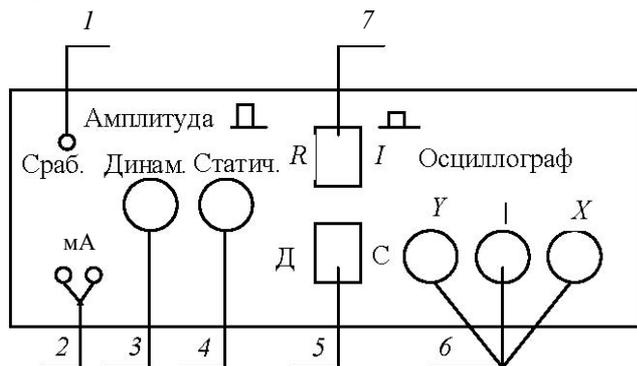


Рис. 6.1. Схема лабораторного стенда:

1 – индикатор замыкания геркона; 2 – клеммы подключения миллиамперметра; 3 – регулятор амплитуды при динамических испытаниях; 4 – регулятор напряжения при статических испытаниях; 5 – переключатель «динамические-статические испытания»; 6 – клеммы подключения осциллографа; 7 – переключатель измеряемого параметра (сопротивления контактов – ток срабатывания-отпускания)

ления, переключатели рода работ, светодиод индикации срабатывания геркона, клеммы для подключения миллиамперметра и осциллографа.

Стенд предназначен для определения магнитодвижущей силы срабатывания геркона $F_{ср}$ (в ампервитках), тока срабатывания и отпускания $I_{ср}$ и $I_{отп}$ (в миллиамперах), времени срабатывания и вибрации контактов ($t_{ср}$ и $t_{вибр}$ – в миллисекундах).

Принципиальная схема лабораторной установки представлена на рис. 6.2. Она состоит из двух частей, предназначенных для измерения статических и динамических параметров и коммутируемых переключателем S_1 «Д/С».

Часть схемы, предназначенная для измерения статических параметров, состоит из цепи обмотки геркона (R_8, R_{10}, W_2), цепи геркона (R_9, I_2), светодиода SD_1 , миллиамперметра и переключателя рода измерений «R/I» S_2 .

В верхнем по схеме положении переключателя S_2 измеряется сопротивление контактов геркона. При этом ток от источника питания протекает через резисторы R_8 и R_{10} и обмотку W_2 , создавая в ней магнитное поле, замыкающее контакты геркона. Ток через контакты огра-

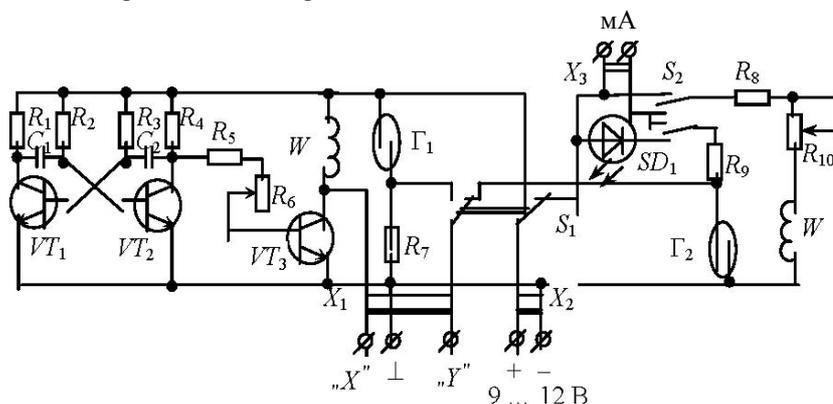


Рис. 6.2. Принципиальная схема лабораторного стенда

ничивается резистором R_9 и измеряется миллиамперметром. По показаниям миллиамперметра и милливольтметра, подключаемого к клеммам «Y» и «□», определяют сопротивление контактов по формуле $R_k = U / I$.

В нижнем положении переключателя S_2 цепь обмотки геркона (R_8, R_{10}, W_2) включается последовательно с миллиамперметром, а цепь геркона (R_9, G_2) – со светодиодом SD_1 «Сраб.». При медленном вращении движка переменного резистора R_{10} изменяется ток через обмотку W_2 , который фиксируется миллиамперметром. При превышении током некоторого значения магнитное поле замыкает контакты геркона, что индицируется светодиодом SD_1 «Сраб.». Значение тока, показываемое миллиамперметром, и будет током срабатывания $I_{ср}$. Вращая движок переменного резистора R_{10} в обратную сторону, добиваются погасания светодиода (размыкания контактов геркона) и считывают значения тока отпущения $I_{отп}$ по шкале миллиамперметра.

Вторая часть схемы предназначена для снятия динамических характеристик геркона $t_{ср}$ и $t_{вibr}$. Она состоит из генератора звуковой частоты (около 100 Гц), собранного по мультивибраторной схеме на транзисторах VT_1 и VT_2 , резисторах $R_1 \dots R_4$ и конденсаторах C_1, C_2 . Генерируемое им прямоугольное напряжение через ограничивающий R_5 и регулирующий R_6 резисторы подаётся на базу усилительного транзистора VT_3 , коллекторный ток которого течёт через обмотку геркона W_1 . Геркон G_1 переключается с частотой генератора. Напряжение, пропорциональное напряжению на герконе, снимается с ограничивающего резистора R_7 и подаётся на вход Y осциллографа. Напряжение, снимаемое с транзистора VT_3 и пропорциональное напряжению на обмотке, подаётся на вход X внешней развертки осциллографа. На экране осциллографа фиксируется время запаздывания замыкания контактов геркона относительно сигнала на катушке (обмотке) и время вибрации контактов.

Порядок выполнения работы

1. Снятие статических параметров геркона производится при установке переключателя «Д/С» в положение «С».
 - 1.1. Переключатель «R/I» установить в положение «I».
 - 1.2. Миллиамперметр подключить к разъёму «mA».
 - 1.3. Ручку «Стат.» повернуть против часовой стрелки до упора.
 - 1.4. Медленно вращая ручку «Стат.» по часовой стрелке, добиться зажигания светодиода «Сраб.» и по шкале миллиамперметра считать $I_{ср}$.
 - 1.5. Медленно вращая ручку «Стат.» против часовой стрелки, добиться погасания светодиода «Сраб.» и считать по шкале миллиамперметра значение $I_{отп}$.
 - 1.6. Определить магнитодвижущую силу срабатывания геркона $F_{ср}$ по формуле

$$F_{ср} = I_{ср}n/1000,$$

где I – полученное значение тока срабатывания, mA; n – число витков (для данного случая $n = 1700$); $F_{ср}$ – магнитодвижущая сила (в ампервитках).

- 1.7. Переключатель «R/I» установить в положение «R».
- 1.8. Движок «Стат.» установить в крайнее положение по часовой стрелке.
- 1.9. Милливольтметр подключить к клеммам «Y» и «□».
- 1.10. По показаниям миллиамперметра и милливольтметра найти R_k по формуле $R_k = U/I$.
2. Снятие динамических характеристик герконов производится при установке переключателя «Д/С» в положение «Д».
 - 2.1. Подключить двухлучевой осциллограф к клеммам «Y» – «□» – «X» стенда, причём кабель, подключённый к клеммам «Y» и «□», соединяют с гнездом «Вход 1», а кабель, подключённый к клемме «X» стенда (штекер □ кабеля остаётся неподключённым, так как это корпус прибора, а вы его уже подключили), соединяют с гнездом «Вход 2» осциллографа. Переключателями «mB» и «Множитель» для каждого входа осциллографа установить удобный для наблюдения размах сигнала на экране (начальное положение переключателей: «mB – 10», «Множитель – 1000»). Переключателем длительности развертки устанавливают удобную для наблюдения длину импульса на экране (начальное положение «Время – 10 мс»).
 - 2.2. Определить $t_{ср}$ и $t_{вibr}$ (см. рис. 6.3).

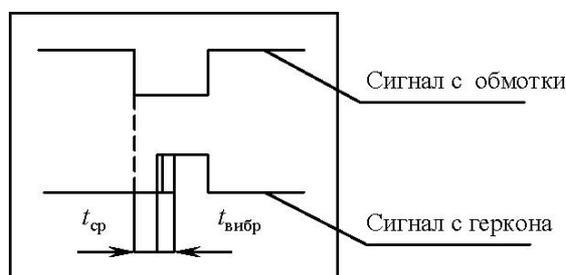


Рис. 6.3. Осциллограмма сигналов

Примечание: Сигнал обмотки W_1 инвертирован относительно сигнала с геркона из-за данного варианта подключения осциллографа к схеме.

1. Принципиальная схема установки.
2. Результаты измерений статических и динамических характеристик.

Контрольные вопросы

1. Опишите устройство и принцип работы геркона.
2. Перечислите достоинства и недостатки герконов.
3. Приведите примеры возможных областей применения герконов.
4. Опишите устройство и принцип работы герконовых реле.
5. Перечислите основные параметры герконовых реле.
6. Дайте сравнительный анализ герконовых реле с другими средствами коммутации.
7. Опишите процедуру снятия динамических характеристик геркона.
8. Опишите процедуру снятия статических характеристик геркона.
9. Возможна ли коммутация герконовым реле цифровых сигналов?

Лабораторная работа 7

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ (ЛИНЕЙНЫХ ПОСТОЯННЫХ РЕЗИСТОРОВ)

Цель работы: исследовать температурную зависимость сопротивления проводниковых материалов; ознакомиться с системой обозначений и типами линейных постоянных резисторов.

Основные сведения

Проводниковыми называют материалы, основным электрическим свойством которых является сильно выраженная электропроводность.

К основным электрическим характеристикам проводниковых материалов относят: удельное сопротивление ρ , температурный коэффициент удельного сопротивления α_ρ , удельную термоэлектродвижущую силу α_T .

В процессе направленного движения электроны испытывают рассеяние на статических (атом, вакансии, междоузельные атомы и т.д.) и динамических (тепловые колебания ионов в узлах кристаллической решётки) дефектах структуры. Интенсивность рассеяния определяет среднюю длину свободного пробега электрона и значение удельного сопротивления проводника, которое может быть выражено следующим образом:

$$\rho = \frac{m \bar{u}}{e^2 n_0 \bar{\lambda}},$$

где m – масса электрона; e – заряд электрона; \bar{u} – средняя скорость теплового движения; n_0 – концентрация свободных электронов; $\bar{\lambda}$ – средняя длина свободного пробега.

Концентрация электронов и средняя скорость их теплового движения в металлах слабо зависят от температуры (электронный газ – вырожденный), но с повышением температуры увеличивается амплитуда колебаний ионов в узлах кристаллической решётки, что приводит к более интенсивному рассеянию электронов в процессе их направленного движения. Соответственно, уменьшается средняя длина свободного пробега и возрастает удельное сопротивление.

Относительное изменение удельного сопротивления при изменении температуры на один Кельвин называют температурным коэффициентом удельного сопротивления:

$$\alpha_\rho = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}.$$

В области линейной зависимости $\rho(T)$ справедливо выражение

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha_\rho (T - T_0)),$$

где ρ_0 и α_ρ – удельное сопротивление и температурный коэффициент удельного сопротивления, отнесённые к температуре T_0 .

Полное удельное сопротивление сплава

$$\rho = \rho_T + \rho_{\text{ост}},$$

где ρ_T – сопротивление, обусловленное рассеянием электронов на тепловых колебаниях узлов решётки; $\rho_{\text{ост}}$ – добавочное (остаточное) сопротивление, связанное с рассеянием электронов на неоднородностях структуры сплава. Для многих двухкомпонентных сплавов изменение остаточного сопротивления от состава хорошо описывается параболической зависимостью вида

$$\rho_{\text{ост}} = ax_A x_B = ax_A (1 - x_A),$$

где x_A , x_B – атомные доли компонентов в сплаве.

Удельное сопротивление тонких металлических плёнок существенно превосходит удельное сопротивление массивного металла. Для сравнительной оценки проводящих свойств плёнок пользуются таким параметром, как сопротивление квадрата поверхности:

$$R_{\square} = \rho / d,$$

где ρ – удельное сопротивление слоя толщиной d .

Резистором называют элемент электронной аппаратуры, обладающий свойством активного электрического сопротивления. В зависимости от применяемых материалов, резисторы могут быть линейными (зависимость падения напряжения от тока представляет собой линейную функцию, что говорит о постоянстве сопротивления) и нелинейными, у которых сопротивление изменяется под воздействием тока или напряжения. Линейные резисторы могут быть постоянными или переменными. Сопротивление постоянного резистора задано при его изготовлении, тогда как в переменных резисторах имеется возможность регулирования сопротивления механически (с помощью третьего подвижного контакта) или бесконтактным способом, с помощью цифрового управления. В настоящей лабораторной работе исследуются только постоянные линейные резисторы, далее *постоянные резисторы*. Постоянные резисторы выпускаются проволочными, плёночными и объёмными.

Мощные проволочные резисторы (5...1000 Вт) имеют трубчатое керамическое основание, на котором намотана спираль из нихрома (Ni 80 % + Cr 20 %) или других сплавов, содержащих никель и хром. У самых мощных резисторов спираль оголена, а у резисторов мощностью до 250 Вт покрыта защитным слоем стекломали. Прецизионные проволочные резисторы выпускаются мощностью 0,05...5 Вт. Они имеют герметичный корпус, внутри которого находится спираль из константана (Cu 55 % + Ni 45 %) или манганина (Cu 86 % + Ni 2 % + Mn 12 %).

Плёночные резисторы (обычно 0,075...2 Вт) имеют резистивный материал в виде плёнки, нанесённой на диэлектрическое основание, в основном цилиндрической формы. Плёночные резисторы подразделяются на углеродистые (материал плёнки – пиролитический углерод), металлоплёночные (плёнки из металлов и их сплавов), металло-окисные и металлодиэлектрические (плёнки оксидов, проводящих стекол и эмалей).

Объёмные резисторы (обычно 0,125...2 Вт) представляют собой спечённую или полимеризованную при повышенной температуре многокомпонентную смесь, содержащую материал – связку и проводящий компонент (композиционные резисторы).

Основные параметры постоянных резисторов, гарантируемые производителем:

- Номинальное сопротивление – это то сопротивление, которое указано на корпусе резистора. Значение номинального сопротивления гарантируется с заданным *допуском* во всём рабочем диапазоне температур (обычно $-55...+70$ °С).

- Допустимое отклонение сопротивления резистора – это те пределы отклонения сопротивления резистора от его номинального значения (в процентах), за которые не должен выходить дрейф сопротивления в заявленных условиях эксплуатации и в течение гарантированного срока службы. Значению допуска всегда предшествует знак \pm , так как реальное значение сопротивления может оказаться выше или ниже номинального. Нормализованные ряды номинальных сопротивлений резисторов и допустимых отклонений от номинального значения приведены в прил. 2.

- Номинальная рассеиваемая мощность – это та мощность, которую может рассеять резистор в спокойной воздушной среде при нормальном атмосферном давлении при непрерывной электрической нагрузке без превышения объявленного допуска на значение сопротивления. Мощность P , которую рассеивает резистор в конкретной электрической цепи, определяется произведением проходящего тока I и падения напряжения U :

$$P = UI. \quad (7.1)$$

Выражая с помощью закона Ома напряжение или ток через сопротивление R , имеем известные формулы для расчёта мощности:

$$P = I^2R \text{ или } P = U^2/R. \quad (7.2)$$

- Температурный коэффициент сопротивления (ТКС или α_R). Этот коэффициент характеризует чувствительность сопротивления резистора к изменениям температуры. ТКС выражают в относительных единицах. Так как температурные изменения сопротивления резисторов очень малы, в справочниках ТКС указывают в единицах миллионных долей относительного изменения сопротивления на градус ($10^{-6} / \text{°C}$). В настоящее время во многих справочниках вместо 10^{-6} принято американское обозначение ppm (Parts Per Million – «частей на миллион»). Размерность ТКС записывают в этом случае в ppm/°C. Численное значение ТКС резистора (в ppm/°C) может быть определено из результатов измерения температурных зависимостей его сопротивления по формуле

$$\alpha_R = (1/R)(dR/dT) \cdot 10^6 = (1/R)(\Delta R/\Delta T) \cdot 10^6, \quad (7.3)$$

где R – сопротивление резистора при некоторой, заданной температуре; ΔR – изменение сопротивления при изменении температуры на ΔT .

Наряду с рассмотренными параметрами, для резисторов также нормируются: максимальное напряжение на зажимах резистора (В), напряжение шумов (мкВ/В), минимальная наработка на отказ (ч), срок сохраняемости (ч), максимальная импульсная мощность (Вт).

Маркировка резисторов. Все мощные, прецизионные и большинство резисторов отечественного производства имеют маркировку, из которой напрямую читаются тип, номинальные мощность и сопротивление, а также допустимое отклонение. Например, проволочный постоянный резистор типа С5-5 мощностью 8 Вт, имеющий сопротивление 68 Ом и допустимое отклонение от номинального сопротивления $\pm 1\%$ имеет на своём корпусе следующую надпись: С5-5 – 8 – 68 Ом $\pm 1\%$. Как следует из приведённого полного обозначения, размерность номинальной мощности в нём не указана, так как мощность принято всегда выражать в ваттах. Это также относится к маломощным резисторам, например: МЛТ – 0,25...10 кОм $\pm 10\%$ (резистор типа МЛТ мощностью 0,25 Вт).

Номинальное сопротивление в приведённом полном обозначении состоит из численного значения (цифра) и обозначения единицы измерения (Ом – омы, кОм – килоомы, МОм – мегаомы, ГОм – гигаомы, ТОм – тераомы). Например: 220 Ом; 150 кОм; 2,2 МОм; 8,2 ГОм; 1 ТОм. Таблица стандартных множителей, соответствующих им префиксов и символов приведена в прил. 1.

В целях уменьшения количества наносимых на поверхность резистора символов часто в обозначение номинального сопротивления вводится множитель, обозначаемый буквой. Латинские буквы R, K, M, G, T обозначают соответственно множители 1, 10³, 10⁶, 10⁹, 10¹² (изредка в русской транскрипции для обозначения единиц Ом вместо R ставят E, а гигаомам соответствует буква Г). Результат расшифровки записанного таким образом значения всегда представляется в омах. Например: 0,1 Ом = R10 или E10; 1 Ом = 1R0 или 1E; 5,6 Ом = 5R6 или 5E6; 330 Ом = 330R или 330E; 1 кОм = 1K0; 3,3 кОм = 3K3; 2,2 МОм = 2M2; 6,8 ГОм = 6G8 или 6Г8.

Ещё одной формой записи номинального значения сопротивления некоторых зарубежных резисторов является запись четырёхзначным числовым кодом. В этом коде первые три цифры задают значащую часть номинала сопротивления, а четвёртая выражает степень множителя 10, на который умножается значащая часть, чтобы получить окончательный результат в омах. Например: 3332 соответствует 333·10² Ом или 33,3 кОм; 9510 соответствует 951·10⁰ или 951 Ом; 8251 соответствует 825·10 = 8,25 кОм и т.д.

В соответствии с международным нормативом CEI62, допустимые отклонения вместо цифр могут шифроваться буквенными символами (табл. 7.1).

Другой широко распространённой системой маркировки резисторов является цветовое кодирование. На резистор в этом случае наносят цветные кольца, образующие код, которым шифруют номинальное значение и допуск (кодировка четырьмя или пятью кольцами). Менее распространённая кодировка шестью кольцами кодирует ещё и значение ТКС, рис. 7.1.

7.1. Кодировка обозначений допустимых отклонений сопротивления

Допуск, %	±0,05	±0,1	±0,25	±0,5	±1	±2	±5	±10
Кодированное обозначение	A	B	C	D	F	G	J	K

Сведения о соответствии цветов значащим цифрам номинального сопротивления, значениям множителей, допусков и ТКС приведены в табл. 7.2.

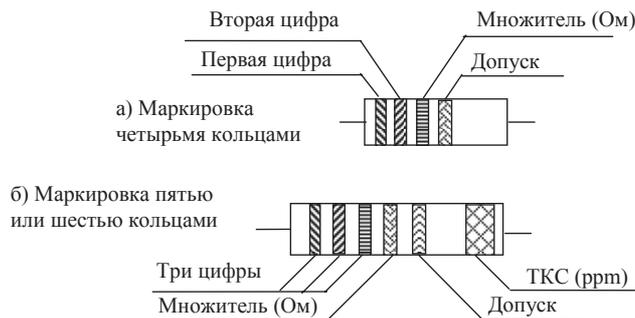


Рис. 7.1. Маркировка резисторов цветовым кодом

7.2. Соответствие цветов колец цифрам, значениям множителей, допусков и ТКС

Цвет кольца	Номинальное сопротивление, Ом				Допуск, %	ТКС, ppm/°C
	Первая цифра	Вторая цифра	Третья цифра	Множитель		
Серебристый	–	–	–	10 ⁻²	± 10	–
Золотистый	–	–	–	10 ⁻¹	± 5	–
Чёрный	–	0	–	1	–	200
Коричневый	1	1	1	10	± 1	100
Красный	2	2	2	10 ²	± 2	50
Оранжевый	3	3	3	10 ³	–	15
Жёлтый	4	4	4	10 ⁴	–	25
Зелёный	5	5	5	10 ⁵	± 0,5	–
Голубой	6	6	6	10 ⁶	± 0,25	10
Фиолетовый	7	7	7	10 ⁷	± 0,1	5
Серый	8	8	8	10 ⁸	± 0,05	1
Белый	9	9	9	10 ⁹	–	–

Порядок выполнения работы

В лабораторной работе исследуется температурная зависимость сопротивления для резисторов различных типов и по результатам измерений вычисляется наибольшее значение температурного коэффициента сопротивления (ТКС) в исследованном температурном диапазоне.

Исследование мощного проволочного резистора. Собрать на лабораторном стенде схему, изображенную на рис. 7.2, и снять вольт-амперную характеристику мощного проволочного резистора R_2 типа ПЭВ–25.

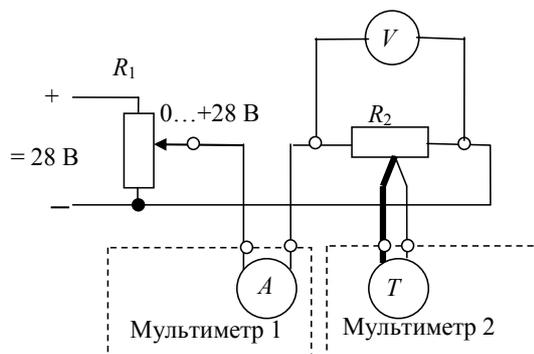


Рис. 7.2. Схема измерений температурной зависимости сопротивления мощного проволочного резистора ПЭВ – 25

Рекомендуется снимать вольт-амперную характеристику, задавая с помощью потенциометра R_1 напряжение на зажимах R_2 через 6 В от нуля до максимально возможного значения (контроль напряжения ведётся по стрелочному вольтметру V). Измерение тока производится с помощью мультиметра I . Одновременно со снятием вольт-амперной характеристики необходимо контролировать температуру резистора R_2 с помощью термопары. Для этого «горячий спай» термопары введён внутрь корпуса резистора, а «холодный спай» должен быть подсоединён к соответствующим входам мультиметра 2. Переход от одной точки измерений к другой необходимо производить только после стабилизации показаний термометра и остальных измерительных приборов.

7.3. Результаты исследования температурной зависимости сопротивления проволочного резистора (тип, номинальное сопротивление)

Температура резистора R_2 , °C	Ток через резистор R_2 , А	Падение напряжения на резисторе R_2 , В	Сопротивление резистора R_2 , Ом	Мощность, рассеиваемая резистором R_2 , Вт

По результатам измерений заполняется табл. 7.3.

По данным табл. 7.3 с помощью закона Ома рассчитываются значения сопротивления резистора R_2 и строятся зависимости R_2 от температуры T , а также зависимость температуры резистора от рассеянной в нём мощности P (формулы (7.1) и (7.2)). Из графика $R_2 = f(T)$ по формуле (7.3) рассчитывается максимальное значение ТКС в исследованном диапазоне температур.

Исследование температурных зависимостей сопротивления композиционных и плёночных резисторов. Получить у преподавателя образцы резисторов. Скопировать в протокол измерений маркировку резисторов и произвести расшифровку их номинальных сопротивлений.

Собрать схему, изображенную на рис. 7.3 и, используя R_2 в качестве нагревателя, исследовать температурную зависимость сопротивления имеющихся образцов резисторов в диапазоне от комнатной температуры до +100 °C. По результатам исследований заполнить табл. 7.4 и рассчитать максимальные ТКС резисторов.

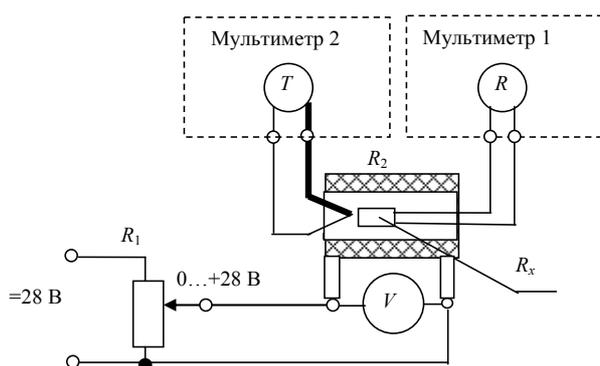


Рис. 7.3. Схема измерений температурных зависимостей сопротивления маломощных резисторов

7.4. Результаты исследований температурных зависимостей сопротивления резисторов различных типов

№ п/п	Тип резистора	Номинальное сопротивление (по маркировке)	Сопротивление при комнатной температуре	Сопротивление при +50 °C	Сопротивление при +100 °C	Расчётное значение ТКС

Содержание отчёта

1. Схемы измерений (рис. 7.2 и 7.3).
2. Заполненные таблицы 7.3 и 7.4.
3. Зависимости сопротивления от температуры для всех исследованных резисторов.
4. Расшифровку маркировки всех исследованных резисторов.
5. Выводы о результатах сравнения температурных зависимостей резисторов различных типов.

Контрольные вопросы

1. Основные параметры постоянных резисторов.
2. Удельное сопротивление ρ , температурный коэффициент удельного сопротивления α_ρ , удельная термоэлектродвижущая сила α_T .
3. Маркировка резисторов.

Используемая литература

1. Резисторы : справочник / под ред. И.И. Четверткова и В.М. Терехова. – М. : Радио и связь, 1991.

Лабораторная работа 8

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ (НЕЛИНЕЙНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ РЕЗИСТОРОВ)

Цель работы: исследование электрических свойств полупроводниковых материалов; ознакомление с характеристиками нелинейных полупроводниковых резисторов – терморезисторов и варисторов.

Основные сведения

Полупроводниками называют материалы с сильной зависимостью удельной проводимости от внешних энергетических воздействий и содержания примесей. В полупроводниках появление носителей заряда возможно лишь при разрыве собственных валентных связей либо при ионизации примесных атомов. Основными характеристиками энергетических затрат являются: ΔE – ширина запрещённой зоны; $\Delta E_{пр}$ – энергия ионизации примесей.

В общем случае удельная проводимость $\gamma = en\mu$, где n и μ – концентрация и подвижность носителей заряда, меняющиеся с температурой.

График зависимости $\ln(n)$ от $1/T$ условно делится на три участка. При низких температурах (1-й участок) донорные уровни заполнены электронами. С увеличением температуры электроны переходят в зону проводимости. Увеличивающаяся при этом концентрация электронов в зоне проводимости определяется выражением

$$n = \sqrt{N_C N_D} e^{-\frac{\Delta E_D}{2kT}},$$

где N_C – эффективная плотность состояний в зоне проводимости, энергия которых приведена к дну зоны проводимости; N_D – концентрация доноров; ΔE_D – энергия ионизации доноров.

Третий участок называют областью собственной проводимости. Концентрация носителей определяется выражением

$$n_i = \sqrt{N_C N_B} e^{-\frac{\Delta E}{2kT}},$$

где N_B – эффективная плотность состояний в валентной зоне; ΔE – ширина запрещённой зоны.

Зависимость подвижности носителей заряда от температуры выражена намного слабее, чем для концентрации, поэтому общий вид зависимости удельной проводимости от температуры определяется в основном зависимостью от нее концентрации носителей заряда.

В лабораторной работе исследуются температурные характеристики полупроводниковых терморезисторов (термисторов) с отрицательным ТКС (*Negative Temperature Coefficient – NTC-термисторы*) и положительным ТКС (*Positive Temperature Coefficient – PTC-термисторы*), а также вольт-амперная характеристика варистора.

NTC-термисторы состоят из поликристаллической смеси различных спечённых оксидов (например Fe_2O_3 , Zn_2TiO_4 , $MgCr_2O_4$ и TiO_2). Они характеризуются сильно падающей монотонной зависимостью сопротивления от температуры. Эта зависимость хорошо изучена и описывается следующим эмпирическим выражением:

$$R_T = R_0 e^{B(1/T - 1/T_0)}, \quad (8.1)$$

где R_T – сопротивление термистора при текущей температуре T ; R_0 – номинальное сопротивление термистора, указываемое в справочнике для температуры T_0 , равной $+25^\circ C$ или $298 K$; B – постоянная, зависящая от материала резистора (значение B обычно лежит в пределах $1000 \dots 6000 K$). Характер зависимости сопротивления NTC-термистора от температуры иллюстрируется рис. 8.1.

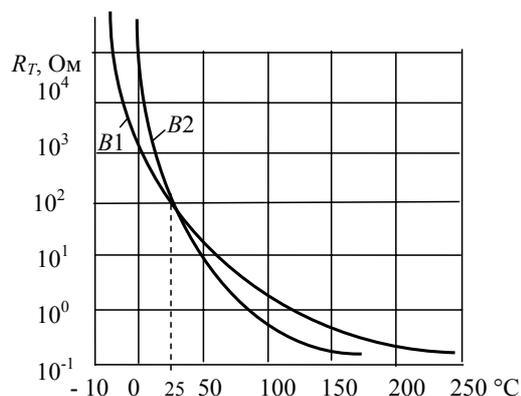


Рис. 8.1. Температурные зависимости сопротивления для двух NTC-термисторов с номинальным сопротивлением 100 Ом и с разными постоянными B ($B_2 > B_1$)

По определению, температурный коэффициент сопротивления любого резистора находится по формуле

$$\alpha_T = \frac{1}{R_T} \frac{dR_T}{dT}. \quad (8.2)$$

Если подставить выражение (1) в формулу (8.2) и взять производную, то получим следующее выражение для ТКС NTC-термистора:

$$\alpha_T = - (B / T^2). \quad (8.3)$$

При использовании данной формулы следует помнить, что B и T выражаются в градусах Кельвина. Из формулы (8.3) следует, что α_T NTC-термистора не является константой, а зависит от температуры. Во всей области рабочих температур (обычно $-55 \dots +155$ °C) абсолютное значение α_T NTC-термисторов оказывается в десятки раз большим, чем у линейных постоянных резисторов. NTC-термисторы широко используются в системах автоматики в качестве датчиков температуры, в устройствах компенсации температурного дрейфа выходных сигналов усилителей и в качестве ограничителей пусковых токов электродвигателей, галогенных ламп и т.д.

NTC-термисторы имеют широкий диапазон размеров и в зависимости от типа могут иметь форму цилиндра, диска, шайбы, капли или бусинки. Маркировка термисторов содержит буквенный шифр типа терморезистора с номером, указывающим на вариант конструктивного исполнения. Далее указывается номинальное сопротивление, соответствующее $+25$ °C, и допуск в процентах. Остальные данные (константа B , предельно допустимая температура и т.д.) содержатся в справочниках. Современные отечественные терморезисторы всегда содержат в своём обозначении букву Т: КМТ-1; ММТ-4; СТ1-17; ТР-1; ТВ-2 и т.д. Следует иметь в виду, что некоторые типы выпускавшихся ранее постоянных линейных резисторов также имели в своём обозначении букву Т: МЛТ, ТВО. Обозначения наиболее популярных серий зарубежных NTC-термисторов (Siemens&Matsushita) начинаются с букв S, M, K или Z, а далее следует двух- или четырёхзначный серийный номер, например S464, M2020, Z10.

PTC-термисторы или позисторы изготавливаются на основе поликристаллической керамики из титаната бария ($BaTiO_3$), легированной различными примесями. Сопротивление позисторов резко (на несколько порядков) возрастает после превышения их температуры над некоторым пороговым значением, что связано с фазовым переходом из сегнетоэлектрического состояния в параэлектрическое. Типовая температурная зависимость сопротивления позистора приведена на рис. 8.2.

Из-за резкого изменения сопротивления масштаб по оси ординат данного графика принято иметь логарифмическим. На участке от R_{ref} до R_{max} логарифм сопротивления позистора растёт линейно с увеличением температуры. Это указывает на экспоненциальный рост функции $R = f(T)$.

Чтобы найти ТКС позистора из полулогарифмической зависимости $\lg R = f(T)$, сделаем простейшие преобразования в формуле (8.2):

$$\alpha_T = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} = \frac{d(\ln R)}{dT} = \ln 10 \frac{d(\lg R)}{dT}. \quad (8.4)$$

$R_{ном}$ – номинальное сопротивление (сопротивление при $T = 25$ °C); R_{min} – минимальное сопротивление (сопротивление при $T = T_{min}$); T_{min} – температура, при которой ТКС из отрицательного становится положительным; R_{ref} – опорное сопротивление ($R_{ref} = 2R_{min}$). Считается, что с R_{ref} начинается быстрый рост зависимости $R = f(T)$; T_{ref} – характеристическая температура, при которой $R = R_{ref}$; (для ряда позисторов вместо T_{ref} и R_{ref} указываются пороговая температура T_{NAT} и соответствующее ей значение сопротивления R_{NAT} , лежащие немного выше T_{ref} и R_{ref}); T_{max} – максимально допустимая температура термистора; R_{max} – сопротивление при T_{max} .

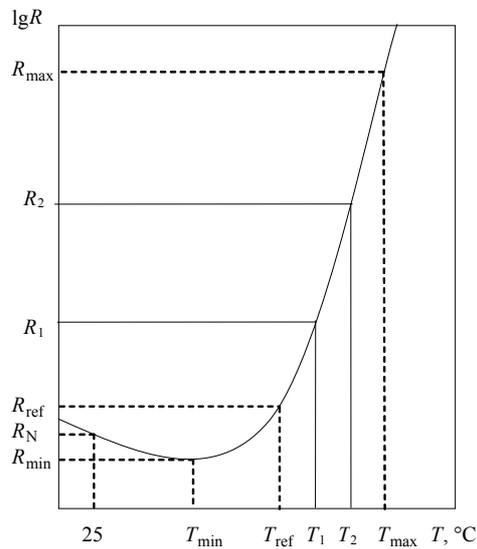


Рис. 8.2. Типовая температурная зависимость позистора

В области резкого увеличения сопротивления α_T позистора приблизительно постоянен. Если на участке от R_{ref} до R_{max} известны два значения сопротивления, например R_1 и R_2 ($R_2 > R_1$), которые соответствуют двум температурам T_1 и T_2 ($T_2 > T_1$), то для α_T будет справедливо:

$$\alpha_T = \frac{\ln(R_2 / R_1)}{T_2 - T_1}. \quad (8.5)$$

В пределах этого температурного диапазона, зная сопротивление для некоторой температуры, можно рассчитать каким станет сопротивление при другой температуре:

$$R_2 = R_1 \cdot \exp[\alpha T (T_2 - T_1)] \quad (8.6)$$

С помощью формулы (8.6) может быть рассчитано сопротивление позистора для выбранной температуры на основании его справочных данных. В этом случае вместо сопротивления R_1 и температуры T_1 используют R_{ref} и T_{ref} , соответственно.

Позисторы нашли широкое применение в схемах ограничения тока, в качестве пускового реле двигателей компрессоров холодильников, в качестве нагревательных элементов фумигаторов, зеркал автомобилей и других устройств, а также как высокочувствительный датчик температуры. Конструктивное исполнение позисторов такое же, как у NTC-термисторов. Маркировка содержит буквенно-цифровой код, обозначающий тип и номинальное сопротивление (при +25 °C) с допуском в процентах. Отечественные позисторы имеют серийные обозначения СТ5; СТ6; СТ8 и т.д. Обозначение PTC-термисторов (Siemens & Matsushita) начинается с букв А, С, D, Е, М или J с последующим серийным номером, например: А19, J50 (позисторы для пуска электродвигателей), С111 (пусковой резистор для газоразрядных ламп).

Варисторы представляют собой полупроводниковые резисторы, сопротивление которых начинает резко падать, если приложенное напряжение увеличивается сверх определённого значения. Вольтамперная характеристика варистора симметрична относительно начала осей координат, рис. 8.3.

Варисторы изготавливают методами керамической технологии из карбида кремния или оксидов металлов. Уменьшение R с ростом напряжения связано с падением сопротивления контактов между зёрнами SiC или оксида. Это происходит вследствие нелинейного роста тока через p - n -переходы, образующиеся на этих контактах, в результате автоэлектронной эмиссии из острых участков зёрен.

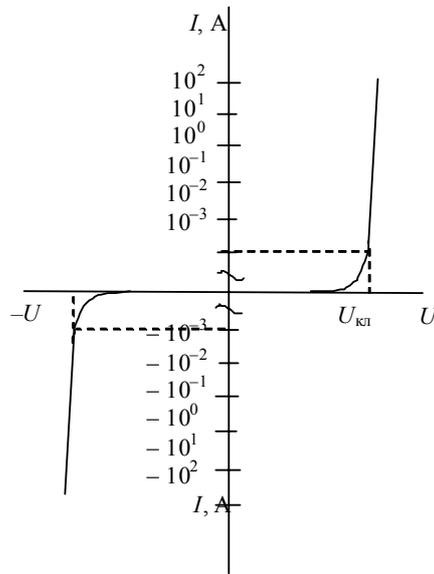


Рис. 8.3. Вольтамперная характеристика варистора

Основными параметрами варисторов являются классификационное напряжение $U_{кл}$, максимально-допустимая выделяемая энергия W и средняя рассеиваемая мощность $P_{ср}$. Напряжение $U_{кл}$ соответствует току через варистор, равному 1 мА. Варисторы всегда работают при напряжениях выше $U_{кл}$, так как основное применение варисторов – защита от кратковременных перенапряжений своим шунтирующим воздействием.

Выделяемая в варисторе энергия W нормируется изготовителем для некоторой максимальной продолжительности перенапряжения. Теплоёмкости структуры варистора оказывается достаточно, чтобы он не перегрелся от однократно выделенной энергии W за время t . Известно, что энергия связана с мощностью следующим выражением:

$$W = \int_0^t P dt, \quad (8.7)$$

где P – аналитическое выражение зависимости мощности от времени; t – временной интервал, для которого ведётся расчёт энергии.

Для прямоугольной формы функции P формула (8.7) приводится к простому выражению:

$$W = Pt. \quad (8.8)$$

Из формулы (8.8) следует, что для варистора с допустимой энергией 1 Дж (диск диаметром 10 мм и массой менее 1 г) при длительности импульса 1 мс, допустимая импульсная мощность равна 1 кВт, а при длительности 1 мкс – 1 МВт.

При наличии повторяющихся импульсных перенапряжений разогрев структуры варистора происходит уже в результате выделения средней мощности:

$$P_{ср} = \frac{1}{T} \int_0^t P dt = F \int_0^t P dt, \quad (8.9)$$

где P – аналитическое выражение зависимости мощности от времени; t – длительность импульса; T – длительность периода; F – частота следования импульсов ($F = 1/T$).

Если импульсная выделяемая мощность $P_{и}$ имеет прямоугольную форму во времени, то для длительности импульса $t_{и}$ средняя выделяемая мощность

$$P_{ср} = (1/T) P_{и} t_{и} = F P_{и} t_{и}. \quad (8.10)$$

Порядок выполнения работы

Исследование NTC-термистора. В лабораторной работе исследуется термистор фирмы EPCOS типа K45 с номинальным сопротивлением 10 кОм $\pm 10\%$ и константой температурной чувствительности $B = 4300 \text{ К} \pm 3\%$. Рабочий диапазон температур $-55 \dots +125 \text{ }^\circ\text{C}$, максимальная рассеиваемая мощность при окружающей температуре $+25 \text{ }^\circ\text{C}$ не более 450 мВт.

Исследование NTC-термистора проводится в схеме, приведённой на рис. 7.3 (лаб. раб. № 7). Перед началом исследования вставьте термистор внутрь резистора R_2 и, не включая нагрев, измерьте с помощью мультиметра I сопротивление термистора при комнатной температуре. Начальная (комнатная) температура измеряется с помощью термометра, подключённого к мультиметру 2. Постепенно увеличивая напряжение, подводимое к R_2 , снимите зависимость сопротивления термистора от температуры во всём диапазоне температур, достигимом на лабораторном стенде. По результатам исследований заполните табл. 8.1.

8.1. Результаты исследований

Температура T , °C						
Температура T , К						
Сопротивление R_T , кОм						
Температурный коэффициент сопротивления α_T , ppm/K						
Константа B , К						

Значения α_T и B рассчитываются по данным соседних столбцов таблицы с помощью формул (8.2) и (8.3). T и R_T каждого столбца (кроме первого и последнего) участвуют в расчётах дважды, как левая и правая границы выделяемых интервалов. По результатам эксперимента строится зависимость сопротивления термистора и ТКС от температуры и рассчитывается среднее значение константы B для всего температурного диапазона.

Исследование позистора. В лабораторной работе исследуется позистор фирмы EPCOS типа D901 с номинальным сопротивлением 100 Ом, пороговой температурой $T_{\text{NAT}} = 70 \pm 5$ °C и пороговым сопротивлением $R_{\text{NAT}} = 570$ Ом.

1. Снять температурную зависимость сопротивления позистора по ранее собранной схеме. По результатам исследований заполнить табл. 8.2.

8.2. Результаты исследований

Температура T , °C						
Сопротивление R_T , Ом						
Температурный коэффициент сопротивления α_T , ppm/°C						

Расчет α_T произвести по формуле (8.5) для возрастающей ветви зависимости $R_T = f(T)$.

2. Собрать схему, приведённую на рис. 8.4 и снять вольтамперную характеристику позистора в режиме его саморазогрева.

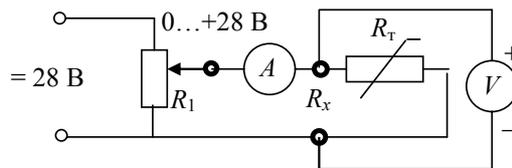


Рис. 8.4. Схема для снятия вольтамперной характеристики позистора

По результатам исследования позистора строятся зависимости его сопротивления от температуры и вольтамперная характеристика в режиме саморазогрева. На основании рассчитанного значения α_T с помощью формулы (8.6) произвести экстраполяцию графика температурной зависимости сопротивления позистора до температуры +125 °C.

Исследование варистора. В лабораторной работе исследуется варистор фирмы EPCOS типа S110 с классификационным напряжением 18 В и допустимой энергией рассеивания 0,8 Дж при длительности импульса до 2 мс.

Вначале исследуется вольтамперная характеристика варистора на постоянном токе. Для этого используется схема рис. 8.4, в которую вместо R_T ставится варистор. Вольтамперная характеристика на постоянном токе снимается до достижения тока 2 мА. Вольтамперная характеристика снимается сначала для одного, произвольно выбранного направления тока, затем полярность присоединения выводов варистора меняется на противоположную и измерения повторяются вновь.

Чтобы не перегревать варистор при дальнейшем увеличении тока, используется импульсная схема включения, показанная на рис. 8.5. Периодическая модуляция тока варистора (прерывание тока) производится при помощи полевого транзистора VT_2 , содержащегося внутри лабораторного стенда (смотрите описание лабораторного стенда). Контроль амплитуды тока производится при помощи шунта RS_3 и осциллографа. Шунт RS_3 , включён в цепь истока полевого транзистора VT_2 . Сопротивление шунта равно 2 Ом.

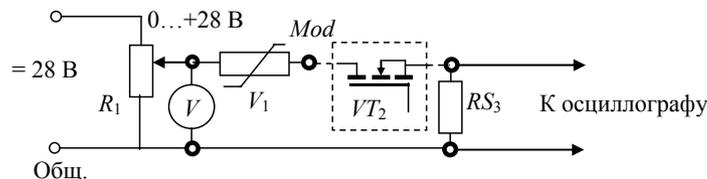


Рис. 8.5. Схема исследования вольтамперной характеристики варистора (V_1) в импульсном режиме

Постепенно увеличивая напряжение, снимаемое с R_1 , добейтесь появления на экране осциллографа импульсов амплитудой порядка 20 мВ, что соответствует амплитуде тока через варистор 10 мА (так как $RS_3 = 2$ Ом). Продолжите увеличение напряжения питания варистора до максимального значения и измеряйте при этом амплитуду протекающего тока. Дополните результаты измерений вольтамперной характеристики на постоянном токе, данными, полученными в результате импульсных измерений.

Содержание отчёта

1. Схемы измерений параметров термисторов и варистора.
2. Заполненные таблицы 8.1, 8.2 и таблицы снятия вольтамперных характеристик варистора.
3. Графики температурных зависимостей сопротивления исследованных термисторов.
4. Вольтамперные характеристики позистора и варистора.
5. Выводы по результатам исследований.

Контрольные вопросы

1. Типы нелинейных полупроводниковых резисторов и их свойства.
2. Применение и схемы включения нелинейных полупроводниковых резисторов.
3. Маркировка термисторов и варисторов.

Используемая литература

1. Резисторы : справочник / под ред. И.И. Четверткова и В.М. Терехова. – М. : Радио и связь, 1991.

ПРИЛОЖЕНИЯ

П.1. Символы множителей, указываемых в маркировке номинала резисторов, конденсаторов и индуктивностей

Численное значение множителя	Название префикса		Латинское обозначение символа	Русское обозначение символа
	Латинское	Русское		
10^{12}	<i>tera</i>	тера	<i>T</i>	Т
10^9	<i>giga</i>	гига	<i>G</i>	Г
10^6	<i>mega</i>	мега	<i>M</i>	М
10^3	<i>kilo</i>	кило	<i>k</i>	к
10^2	<i>hecto</i>	гекто	<i>h</i>	г
10^1	<i>deca</i>	дека	<i>da</i>	дк
1				
10^{-1}	<i>deci</i>	деци	<i>d</i>	д
10^{-2}	<i>centi</i>	санци	<i>c</i>	с
10^{-3}	<i>milli</i>	милли	<i>m</i>	м
10^{-6}	<i>micro</i>	микро	μ	мк
10^{-9}	<i>nano</i>	нано	<i>n</i>	н
10^{-12}	<i>pico</i>	пико	<i>p</i>	п

П.2. Ряды номинальных сопротивлений резисторов и ёмкостей конденсаторов для пяти наиболее распространенных групп допустимого отклонения (E6... E96)

$\pm 20\% - E6$	$\pm 10\% - E12$	$\pm 5\% - E24$	$\pm 2\% - E48$	$\pm 1\% - E96$
100	100	100	100	100
			102	102
			105	105
			107	107
			110	110
			113	113
			115	115
			118	118
			120	120
			121	121
			124	124
			127	127
			130	130
			133	133
150	150	150	137	137
			140	140
			143	143
			147	147
			150	150
			154	154
			158	158
			162	162
			165	165
			169	169
			174	174

	180	180	178	178
			187	182
			196	187
		200	205	191
			215	196
220	220	220	226	200
			237	205
		240	249	210
				215
				221
				226
				232
				237
				243
				249

Продолжение табл. П.2

$\pm 20\% - E6$	$\pm 10\% - E12$	$\pm 5\% - E24$	$\pm 2\% - E48$	$\pm 1\% - E96$
				255
			261	261
	270	270	274	267
			287	274
			301	280
		300	316	287
			332	294
330	330	330	348	301
		360	365	309
			383	316
	390	390	402	324
			422	332
		430	442	340
			464	348
	470	470	487	357
			511	365
470		510	536	374
			562	383
		620	619	392
			649	402
				412
				422
				432
				442
				453
				464
				475
				487
				499
				511
				523
				536
				549
	560	560	562	562
			590	576
			619	590
			649	604
				619
				634
				649

Продолжение табл. П.2

$\pm 20\% - E6$	$\pm 10\% - E12$	$\pm 5\% - E24$	$\pm 2\% - E48$	$\pm 1\% - E96$
				665
	680	680	681	681
			715	698
680			750	715
		750	787	732
	820			750
				768
				787

	820	825	806
		866	825
	910	909	845
		953	866
			887
			909
			931
			953
			976

П.3. Буквенные обозначения допусков резисторов и конденсаторов

Допуск, %	Буквенное обозначение		Ряд номиналов
	Латинское	Русское	
± 0,1	B	Ж	E192
± 0,2	C	У	
± 0,5	D	Д	
± 1,0	F	Р	E96
± 2,0	G	Л	E48
± 5,0	J	И	E24
± 10	K	С	E12
± 20	M	В	E6
± 30	N	Ф	E3

П.4. СИСТЕМА УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ КОНДЕНСАТОРОВ РЕЗИСТОРОВ ОТЕЧЕСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Условное обозначение конденсатора состоит из следующих элементов:

- первый элемент (буква или сочетание букв), обозначающий подкласс конденсатора: К – постоянной ёмкости; КТ – подстроечный; КП – переменной ёмкости;
- второй элемент (одна или две буквы), обозначающий группу конденсатора в зависимости от материала диэлектрика (табл. П.4);
- третий элемент (пишется через дефис), указывающий регистрационный номер конкретного типа конденсатора.

Условные обозначения конденсаторов в зависимости от материала диэлектрика

Подкласс	Группа	Обозначение группы
Конденсаторы постоянной ёмкости	Керамические низковольтные ($U_{\text{ном}} < 1600 \text{ В}$)	10
	Керамические высоковольтные ($U_{\text{ном}} > 1600 \text{ В}$)	15
	Стекланные	21
	Стеклокерамические	22
	Тонкоплёночные с неорганическим диэлектриком	26
	Слюдяные	31
	Бумажные низковольтные, фольговые	40
	Бумажные высоковольтные, фольговые	41
	Бумажные металлизированные	42
	Оксидно-электролитические (фольговые), алюминиевые	50
	Оксидно-электролитические (фольговые), танталовые или ниобиевые	51
	Оксидно-пористые (жидкостные)	52
	Оксидно-полупроводниковые	53
	Оксидно-металлические	55

Подкласс	Группа	Обозначение группы
Конденсаторы постоянной ёмкости	Воздушные	60
	Вакуумные	61
	Полистирольные фольговые	70
	Полистирольные металлизированные	71
	Фторопластовые	72
	Лавсановые фольговые	73
	Лавсановые металлизированные	74
	Комбинированные плёночные	75
	Лакоплёночные	76
	Поликарбонатные	77
	Полипропиленовые	78
Подстроечные конденсаторы, конденсаторы переменной ёмкости	Воздушные	1
	Вакуумные	2
	С газообразным диэлектриком	3
	С твёрдым диэлектриком	4
	С жидким диэлектриком	5

Условное обозначение резистора состоит из следующих элементов:

- первый элемент (буква или сочетание букв), обозначающий подкласс резистора: Р – резисторы постоянные; РП – резисторы переменные (регулируемые и подстроечные); НР – наборы резисторов;
- второй элемент (цифра), обозначающий группу резистора в зависимости от материала резистивного элемента: 1 – непроволочные; 2 – проволочные или металлофольговые;
- третий элемент (пишется через дефис), указывающий регистрационный номер конкретного типа резистора.

Для резисторов, разработанных до 1968 г., первый и второй индексы обозначают: С – резисторы постоянные; СП – резисторы переменные; 1 – непроволочные тонкослойные углеродистые; 2 – непроволочные тонкослойные металлодиэлектрические и металлоокисные; 3 – непроволочные композиционные плёночные; 4 – непроволочные композиционные объёмные; 5 – проволочные; 6 – непроволочные тонкослойные металлизированные; 7 – металлофольговые.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
Лабораторная работа 1. ИССЛЕДОВАНИЕ КАТУШЕК ИНДУКТИВНОСТИ	4
Лабораторная работа 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПИТАНИЯ	16
Лабораторная работа 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ФИЛЬТРА	32
Лабораторная работа 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КОНДЕНСАТОРОВ ПОСТОЯННОЙ ЁМКОСТИ	36
Лабораторная работа 5. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КОНДЕНСАТОРОВ ПЕРЕМЕННОЙ ЁМКОСТИ (ВАРИКАПОВ)	45
Лабораторная работа 6. ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГЕРКОНОВ	50
Лабораторная работа 7. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ (ЛИНЕЙНЫХ ПОСТОЯННЫХ РЕЗИСТОРОВ)	55
Лабораторная работа 8. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ (НЕЛИНЕЙНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ РЕЗИСТОРОВ)	63
ПРИЛОЖЕНИЯ	73