

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ»

Б.Л. Антипов С.Ю. Овчинников Е.Л. Солодовникова

Компоненты электронной техники

Лабораторный практикум

Санкт-Петербург
Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
2014

УДК 621.396 : 658.512

ББК 385-03я73

A72

Антипов Б.Л., Овчинников С.Ю., Солодовникова Е.Л.

A72 Компоненты электронной техники: Лабораторный практикум.
СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. с.

Рассмотрены основные свойства и характеристики пассивных элементов электронной техники. Дается описание лабораторных работ по исследованию линейных постоянных и переменных резисторов, конденсаторов различных типов, полупроводниковых нелинейных резисторов, катушек индуктивности на ферритовых сердечниках, пассивных элементов гибридных интегральных микросхем, элементов преобразовательных устройств.

Предназначено для бакалавров, обучающихся по направлениям 210100 «Электроника и наноэлектроника» и 222900 «Нанотехнологии и микросистемная техника».

Рецензенты: кафедра физики твердого тела и микроэлектроники Новгородского государственного университета им. Ярослава Мудрого;
д-р технических наук Г.Г. Горбунов (ГОИ им. С.И.Вавилова)

Утверждено
редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия

ISBN 5-7695-2780-3

© СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАССИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

1.1. Основные понятия и определения

Пассивные элементы электронной техники – конденсаторы, резисторы и катушки индуктивности – служат для перераспределения и регулирования напряжений, токов и мощностей в отдельных участках электрических схем.

К основным параметрам конденсатора относят номинальную емкость $C_{\text{ном}}$, температурный коэффициент емкости ТКЕ, тангенс угла потерь $\text{tg } \delta_C$.

Номинальная (расчетная) емкость конденсатора зависит от его конструкции, геометрических размеров, а также от диэлектрической проницаемости используемого в нем диэлектрика. Точность, с которой обеспечивается получение номинальной емкости, характеризуется значением допуска в процентах относительно номинала.

Номинальные емкости и допуски конденсаторов (так же как номинальные сопротивления и допуски резисторов) нормализованы и выбираются из стандартных числовых рядов (см. прил., табл. П.1 и П.2). Номинальные емкости конденсаторов и сопротивления резисторов общего назначения (с допусками $\pm 5\%$, $\pm 10\%$, $\pm 20\%$ и $\pm 30\%$) должны соответствовать числам, приведенным в табл. П.1 или полученным путем умножения этих чисел на 10^n , где $n = 0, \pm 1, 2, 3, \dots$. Обозначения допуска в виде русских или латинских буквенных индексов указаны в табл. П.2.

Для современных конденсаторов маркировка номинальных емкостей и допусков указывается в виде буквенно-цифрового кода в русской или международной (латинской) транскрипции. Номинальные емкости менее 10^{-10} Ф обозначаются в пикофарадах (буквенный индекс П или p), $C_{\text{ном}}$ от 10^{-10} до 10^{-7} Ф в нанофарадах (индекс Н или n), а $C_{\text{ном}} > 10^{-7}$ Ф обозначаются в микрофарадах (индекс М или μ). При дробных значениях номинальных величин буквы, обозначающие единицы измерения, ставятся на месте запятой. Буквенное обозначение допуска указывается сразу после кода номинальной емкости, например: $C_{\text{ном}} = 1500 \text{ пФ} \pm 5\%$ кодируется как 1Н5И или 1n5J; $C_{\text{ном}} = 0,1 \text{ мкФ} \pm 20\%$ – М1В или $\mu 1M$; $C_{\text{ном}} = 11 \text{ пФ} \pm 1\%$ – 11ПР или 11pF и т. д.

Температурный коэффициент емкости α_C (или ТКЕ) отражает отклонение емкости, обусловленное изменением температуры, и, следовательно, характеризует температурную стабильность емкости конденсатора. Общее определение этого параметра соответствует выражению

$$\alpha_C = \text{TKE} = (1/C) \cdot (dC/dt) \quad (1.1)$$

Нормировать (задать) α_C конденсатора можно в том случае, если зависимость емкости конденсатора от температуры носит линейный характер, что имеет место для конденсаторов, в которых используются материалы с мгновенными видами поляризации (электронная и ионная). В зависимости от того, какой из этих видов поляризации преобладает, ТКЕ будет иметь положительный или отрицательный знак. Тогда, задав при комнатной температуре $t_{\text{комн}}$ номинальную емкость $C_{\text{ном}}$ и α_C , можно определить емкость при любой другой температуре t (с учетом знака α_C):

$$C = C_{\text{ном}}[1 + \alpha_C(t - t_{\text{комн}})].$$

Приняты условные обозначения нормированного α_C , содержащие букву и цифры (они маркируются на конденсаторе). Цифры показывают значение α_C в миллионных долях изменения емкости, отнесенных к одному градусу, а буква, стоящая перед цифрами, обозначает знак ТКЕ: М или N – отрицательный, П или P – положительный; для конденсаторов с $\alpha_C \approx 0$ используется индекс МП0 или NP0 (табл. 1.1).

При использовании в конденсаторах диэлектриков с замедленными видами поляризации (дипольно-релаксационной – в полярных органических диэлектриках и спонтанной – в сегнетокерамике) зависимость емкости от температуры носит нелинейный характер, и задавать ТКЕ лишено смысла.

Таблица 1.1

Температурная стабильность емкости высокочастотных конденсаторов

Кодированное обозначение температурного коэффициента емкости	Величина α_C , K^{-1}
П100	$+100 \cdot 10^{-6}$
П33	$+33 \cdot 10^{-6}$
МП0	≈ 0
М47	$-47 \cdot 10^{-6}$
М75	$-75 \cdot 10^{-6}$
М150	$-150 \cdot 10^{-6}$
М750	$-750 \cdot 10^{-6}$
М1500	$-1500 \cdot 10^{-6}$
М2200	$-2200 \cdot 10^{-6}$

Температурная стабильность таких конденсаторов может быть охарактеризована величиной максимально допустимого относительного изменения емкости (в процентах относительно номинальной емкости, задаваемой для 20°C) в рабочем интервале температур (от t_{min} до t_{max}). Кодированное обозначение температурной стабильности таких конденсаторов ("группа по ТКЕ")

начинается с буквы Н (или *H* латинское), после которой округленно, в процентах, указывается максимально возможное изменение емкости в рабочем интервале температур (табл. 1.2).

Таблица 1.2

**Группы температурной стабильности
емкости низкочастотных конденсаторов**

Кодированное обозначение группы стабильности	$ \Delta C _{\max} / C_{\text{ном}}, \%$
H10	≤ 10
H20	≤ 20
H30	≤ 30
H50	≤ 50
H70	≤ 70
H90	до 90

При включении конденсатора под напряжение в нем наблюдаются потери электрической энергии, приводящие к его нагреванию. Потери энергии складываются из потерь в диэлектрике и потерь в проводящих частях конденсатора. Для описания потерь на переменном напряжении обычно используют тангенс угла потерь $\text{tg}\delta_c$, где δ_c – угол, дополняющий до 90° угол сдвига фаз между действующим на конденсатор напряжением и проходящим через него током. Параметр $\text{tg}\delta_c$ характеризует склонность конденсатора рассеивать энергию и, в конечном счете, определяет возможность использования конденсатора в заданном диапазоне частот.

Применяя конденсаторы при высоких частотах, необходимо учитывать, что конденсатор имеет некоторое активное сопротивление r и некоторую собственную индуктивность L_c . Для того, чтобы учесть наличие в конденсаторе r и L_c , кроме его емкости C , вместо реактивного сопротивления x_c надо пользоваться полным сопротивлением конденсатора

$$Z = [r^2 + (x_c - x_L)^2]^{0.5} = \{r^2 + [(1/(\omega C) - \omega L_c)]^2\}^{0.5}. \quad (1.2)$$

Это выражение соответствует последовательной эквивалентной схеме конденсатора, предусматривающей последовательное включение C , r и L_c .

При увеличении частоты x_c снижается, а x_L растет, поэтому зависимость полного сопротивления конденсатора от частоты должна иметь *U*-образный характер. При частоте выше резонансной конденсатор ведет себя уже не как емкость, а как индуктивность:

$$f_{\text{рез}} = 1 / [2\pi(L_c C)^{0.5}]. \quad (1.3)$$

Собственная индуктивность конденсаторов зависит от его конструкции и габаритов. Наибольшей индуктивностью обладают спиральные конденсаторы.

Практически о емкости конденсатора судят по величине переменного тока I , протекающего через конденсатор при подаче на него переменного напряжения U (очевидно, что $I = U/Z$). Частотные свойства конденсатора можно также охарактеризовать его эффективной емкостью $C_{эф}$, определяемой из соотношения $Z = 1/(\omega C_{эф})$.

Если в конденсаторе $\omega L \gg r$, то

$$C_{эф} = C / (1 - \omega^2 L_C C), \quad (1.4)$$

т.е. $C_{эф}$ увеличивается с частотой.

Если емкость с частотой уменьшается, то это может быть объяснено снижением ε диэлектрика с замедленными видами поляризации (полярные полимеры, сегнетокерамика) или влиянием активного последовательного сопротивления, что наблюдается в оксидных конденсаторах. Если $r \gg \omega L$, то

$$C_{эф} = C / (1 + \omega^2 C^2 r^2)^{0.5}. \quad (1.5)$$

Собственная индуктивность конденсатора может быть определена по формуле

$$L_C = (C_2 - C_1) / [4\pi^2 C_1 C_2 (f_2^2 - f_1^2)], \quad (1.6)$$

где C_1, C_2 – емкости конденсатора, измеренные при частотах f_1 и f_2 соответственно ($f_2 > f_1$).

Частотная стабильность конденсаторов характеризуется величиной

$$\delta C = 100 \cdot (C_2 - C_1) / C_1, \%, \quad (1.7)$$

В конденсаторах с мгновенными видами поляризации потери в диэлектриках обусловлены сквозной электропроводностью, тогда тангенс угла потерь можно рассчитать из выражения:

$$\operatorname{tg} \delta_C = \omega r C + 1/(\omega C R_{из}), \quad (1.8)$$

где $R_{из}$ – сопротивление изоляции конденсатора.

Первый член в выражении (1.8) характеризует потери в металлических частях конденсатора (r измеряется по последовательной схеме замещения при определении L_C), а второй член – потери в диэлектрике при измерении проводимости по параллельной схеме замещения.

В сегнетокерамических конденсаторах наблюдается изменение емкости при изменении величины приложенного напряжения, которое можно оценить коэффициентом напряжения

$$K_U = 100 \cdot (C_U - C_0) / C_0, \%, \quad (1.9)$$

где C_0 и C_U – емкости, измеренные без напряжения смещения и при его подаче.

В свою очередь, резисторы не являются чисто активными сопротивлениями $R = R_{\text{ном}}$ – для них характерно наличие собственной индуктивности L_R (включена последовательно с R) и собственной емкости C_R (включена параллельно R). Обычно $1 / (\omega C_R) \gg R$ и полное сопротивление резистора

$$Z = R_{\text{эф}} = (R^2 + \omega^2 L^2)^{0.5}. \quad (1.10)$$

Величина L_R зависит от конструкции и габаритов резисторов (максимальной L_R обладают проволочные резисторы и пленочные резисторы со спиральной нарезкой).

Частотная стабильность резисторов может быть охарактеризована величиной

$$\delta R = 100 \cdot (R_2 - R_1) / R_1, \%, \quad (1.11)$$

где R_1 и R_2 – сопротивления резисторов, обычно измеренные на частотах $f_1 = 0$ (постоянное напряжение) и $f_2 = 1$ МГц соответственно.

Для композиционных резисторов влияние на частотную стабильность может оказывать и собственная емкость резистивного элемента.

Катушки индуктивности также имеют собственную параллельную емкость C_L и последовательное активное сопротивление обмотки $R_{\text{об}}$, которое зависит от частоты.

Эффективная индуктивность катушки находится из выражения

$$L_{\text{эф}} = L / (1 - \omega^2 L C_L). \quad (1.12)$$

Потери в катушках индуктивности принято характеризовать добротностью Q , полагая, что $Q = 1 / (\text{tg} \delta_L)$.

1.2. Описание установки

Для определения параметров элементов используются два радиоизмерительных прибора: цифровой измеритель иммитанса Е7-12 (частота измерений 1 МГц) и универсальный измеритель Е7-20 (частоты измерений от 25 Гц до 1 МГц).

Температурная стабильность конденсаторов исследуется на примере образцов, находящихся в термостате пульта лабораторной работы "Исследование свойств конденсаторных материалов".

Другие исследуемые элементы выдает преподаватель (у него следует узнать наименования конденсаторов, резисторов и катушек индуктивности, а также значения некоторых их параметров).

Исследуемые элементы поочередно подключаются к измерительным клеммам приборов Е7-12 и Е7-20.

Внимание: При большом количестве исследуемых образцов, по указанию преподавателя, эта работа может выполняться за 2 занятия (4 часа).

1.3. Проведение испытаний с использованием прибора Е7-12

1.3.1. Подготовка к испытаниям

Включить прибор Е7-12, соединить его измерительные клеммы с выводами "С" пульта для исследования свойств конденсаторных материалов. Тумблеры СЕТЬ и НАГРЕВ пульта не включать!

Переключатель рода работ прибора Е7-12 поставить в положение "С-Д", переключатель ПРЕДЕЛЫ – в положение АВТ. Убедиться, что на пульте смещения установлено напряжение, равное нулю.

В положении "С0" переключателя образцов лабораторного пульта измерить и записать емкость проводников, соединяющих образцы в термостате с прибором (C_0).

1.3.2. Измерение емкости и $\text{tg}\delta$ конденсаторов при комнатной температуре

Включить на пульте тумблер СЕТЬ и отметить значение комнатной температуры. Переключатель образцов на пульте установить в положение, соответствующее определенному материалу, и произвести измерение. Емкость образца будет равна разности показаний прибора и C_0 . Измерить емкости всех образцов при комнатной температуре. Произвести одновременно измерение $\text{tg}\delta$ для всех образцов.

Результаты измерений занести в табл. 1.3 для образцов $C1...C4$ и в табл. 1.4 для образца $C5$. Записать названия материалов, используемых в исследуемых конденсаторах.

1.3.3. Определение нелинейности емкости сегнетокерамического конденсатора при комнатной температуре

Поставить переключатель образцов в положение $C5$ и измерить емкость и $\text{tg}\delta$ сегнетокерамического конденсатора при различных напряжениях сме-

щения $U_{см}$, устанавливая их с помощью пульта смещения прибора Е7-12 в соответствии с табл.1.5.

Переключатель образцов оставить в положении С5.

1.3.4. Определение температурных зависимостей емкости и $tg\delta$.

Поставить регулятор УСТАНОВКА ТЕМПЕРАТУРЫ в крайнее левое положение. Включить на пульте тумблер НАГРЕВ. После прекращения роста температуры (через 2-3 мин) отметить значение установившейся температуры и произвести измерения емкости и $tg\delta$ образца С5. Результаты измерений занести в табл. 1.4. С помощью регулятора (вплоть до его крайнего положения) увеличивать температуру в термостате, повторяя измерения для С5 при других установившихся температурах.

Таблица 1.3

Температурная зависимость емкости и $tg\delta$ исследуемых высокочастотных конденсаторов

Конденсаторы		С1	С2	С3	С4
Название материала					
$C_{изм}$, пФ (при $t_{комн} = $)					
$tg\delta$ (при $t_{комн} = $)					
$C_{изм}$, пФ (при $t_{max} = $)					
$tg\delta$ (при $t_{max} = $)					
$C_{ном}$, пФ					
Код $C_{ном}$ и допуска	Русский				
	Латинский				
ТКЕ _{расч} , К ⁻¹					
ТКЕ _{ном} , К ⁻¹					
Код ТКЕ	Русский				
	Латинский				

Таблица 1.4

Температурная зависимость емкости и $tg\delta$ сегнетокерамического конденсатора

t , °С	$C_{изм}$, пФ	$tg\delta$

1.3.5. Определение нелинейности емкости сегнетокерамического конденсатора при повышенной температуре

Поставить переключатель образцов в положение *C5*. Провести измерения емкости и $\text{tg}\delta$ сегнетокерамического конденсатора при $t = t_{\max} > \theta_K$ для различных напряжений смещения $U_{\text{см}}$. Результаты записать в табл. 1.5.

После окончания измерений вернуть регулятор температуры в крайнее левое положение, выключить тумблеры НАГРЕВ и СЕТЬ. Установить $U_{\text{см}} = 0$. Отсоединить прибор Е7-12 от лабораторного пульта.

Таблица 1.5

Определение нелинейности емкости сегнетокерамического конденсатора

$U_{\text{см}},$ В	$t_{\text{комн}} =$		$t_{\text{max}} =$	
	$C, \text{ пФ}$	$\text{tg}\delta$	$C, \text{ пФ}$	$\text{Tg}\delta$
0				
10				
20				
30				
39,9				

В крайнем правом положении переключателя УСТАНОВКА ТЕМПЕРАТУРЫ (при максимальной температуре t_{\max}) провести измерения емкости и $\text{tg}\delta$ образцов $C1 \dots C4$. Результаты записать в табл. 1.3.

1.3.6. Определение иммитанса элементов на частоте 1 МГц

Поочередно подключая к присоединительному устройству прибора Е7-12 исследуемые резисторы, конденсаторы и катушки индуктивности (их выдает преподаватель), определить в положениях переключателя рода работ Е7-12 "C - G", "C - D", "L - R" параметры полного сопротивления: C , $\text{tg}\delta$, G , L_C и r – для конденсаторов, R и L_R – для резисторов, L , $R_{\text{об}}$, C_L и G – для катушек индуктивности. (При этом следует подбирать требуемый предел измерений). Повторить измерения емкости конденсаторов (для некоторых образцов, по указанию преподавателя) при $U_{\text{см}} = 39$ В. Результаты измерений записывать в табл. 1.6, 1.7 и 1.8.

Таблица 1.6

Параметры резисторов на частоте 1МГц

Название резистора				
$R_{\text{ном}}, \text{ Ом}$				
Допуск $R_{\text{ном}}, \%$				
$R_{\text{изм}}, \text{ Ом}$				
$L_R, \text{ мкГн}$				
$R_{\text{эф}}, \text{ Ом}$				

Таблица 1.7

Параметры конденсаторов на частоте 1 МГц

Название конденсатора					
$C_{\text{ном}}$, пФ					
Допуск $C_{\text{ном}}$, %					
$C_{\text{изм}}$, пФ (при $U_{\text{см}} = 0$)					
$C_{\text{изм}}$, пФ (при $U_{\text{см}} = 39$ В)					
$\text{Tg}\delta$					
G , мкСм					
L_C , мкГн					
r , Ом					
Z , Ом					
$C_{\text{эф}}$, пФ					
$f_{\text{рез}}$, МГц					
$R_{\text{из}}$, МОм					
K_U , %					

Таблица 1.8

Параметры катушек индуктивности на частоте 1 МГц

Номер катушки	$L_{\text{изм}}$, мГн	$R_{\text{об}}$, Ом	C_L , пФ	G_C , мкСм	$L_{\text{эф}}$, мГн	Z , Ом	$f_{\text{рез}}$, МГц	Q

1.4. Обработка результатов

1.4.1. По данным, полученным в п. 1.3.2 и 1.3.4, пользуясь табл. П.1 и П.2, определить номинальную емкость для конденсаторов $C1 \dots C4$. Записать код номинальной емкости и допуска в русской и латинской транскрипциях. (Конденсаторы $C1$ и $C2$ имеют допуск $\pm 5\%$, $C3$ и $C4$ – допуск $\pm 10\%$).

Полагая, что температурные зависимости емкостей $C1 \dots C4$ имеют линейный характер, рассчитать, пользуясь выражением (1.1) и табл. 1.1, номинальные ТКЕ, записать их коды. Результаты внести в табл. 1.3.

1.4.2. По данным, полученным в п. 1.3.4, построить температурную зависимость емкости и $\text{tg}\delta$ сегнетокерамического конденсатора $C5$. Определить номинальную емкость (допуск $\pm 20\%$) и группу по ТКЕ (полагая, что $t_{\text{min}} = t_{\text{комн}}$), записать их коды. Отметить температуру Кюри сегнетоэлектрика.

1.4.3. По данным, полученным в п. 1.3.3 и 1.3.5, построить зависимости емкости и $\text{tg}\delta$ сегнетокерамического конденсатора $C5$ от напряжения смещения для двух температур.

1.4.4. По данным, полученным в п. 1.3.6, рассчитать полное сопротивление, сопротивление изоляции, эффективную емкость, коэффициент напряже-

ния и резонансную частоту исследованных конденсаторов. Результаты расчетов внести в табл. 1.7. Для одного из конденсаторов (по указанию преподавателя) определить, пользуясь выражением (1.8), соотношение потерь в металлических частях и в диэлектрике.

1.4.5. По данным, полученным в п. 1.3.6, рассчитать эффективное сопротивление для исследованных резисторов. Результаты расчетов внести в табл. 1.6.

1.4.6. По данным, полученным в п. 1.3.6, рассчитать эффективную индуктивность, добротность, полное сопротивление и резонансную частоту исследованных катушек индуктивности. Результаты внести в табл. 1.8.

1.5. Определение частотных характеристик пассивных элементов с использованием измерителя иммитанса типа Е7-20

1.5.1. Включить прибор с помощью тумблера, расположенного на задней панели. Измеряемый элемент подключить к контактным зажимам присоединительного устройства. Информация на дисплее прибора: первая строка – пределы измеряемой величины; вторая строка – уровень переменного сигнала (должен быть равен 1 В); третья строка – частота, на которой проводится измерение (рекомендуется начинать с частоты 0,1 кГц); четвертая строка – постоянное напряжение смещения (должно быть равным нулю).

Изменение показаний на дисплее производится при нажатии кнопки "Меню". Выделение нужного раздела меню производится нажатием кнопок ▲, ▼. Установка рабочей частоты производится кнопками ◀, ▶ после нажатия кнопки "Част". Установка напряжения измерительного сигнала производится кнопками ◀, ▶ после нажатия кнопки "Уров".

Установка постоянного напряжения смещения производится кнопками ◀, ▶ после нажатия кнопки "Смещ". Запоминание установленных величин производится нажатием кнопки "Ввод".

Измерение составляющих иммитанса элементов производится в режиме меню "Параметр". Выбор измеряемого параметра производится нажатием одной из кнопок "L, C, R, J, Z". Измерение может проводиться при параллельной "Parallel" или последовательной "Serial" схемах замещения. Выбор схемы в режиме меню "Эквив. Схема" производится нажатием кнопок в левом ряду или кнопками ▲, ▼ с последующим запоминанием с помощью кнопки "Ввод". Предусмотрен автоматический выбор схемы ("Auto"): параллельной для высокоомных и последовательной для низкоомных элементов. Все изме-

рения должны производиться с уже установленной стандартной скоростью ("Норма" в режиме меню "Скор. Измер".)

1.5.3. Произвести измерение параметров выданных преподавателем резисторов, конденсаторов, индуктивных и соединительных элементов на низкой частоте ($f_1 = 100$ Гц).

ВНИМАНИЕ!: В протоколе испытаний результаты измерений записываются в произвольной форме. Не забывайте записывать название и тип исследованных элементов (их указывает преподаватель). Преподаватель может уменьшить количество перечисленных ниже исследуемых элементов.

Для резисторов производится измерение следующих параметров: R_s , L_s , X_s , $|Z|$, φ . Типы исследуемых резисторов: металлодиэлектрический (металлопленочный), композиционный, проволоочный.

Для индуктивных элементов производится измерение следующих параметров: R_s , L_s , X_s , $|Z|$, Q и φ . Типы исследуемых элементов: без магнитного сердечника, с ферритовым сердечником, с ферромагнитным сердечником.

Для конденсаторов производится измерение следующих параметров: C_p , G_p , D , L_s , R_s , $|Z|$, φ , J (для параллельной схемы). Типы исследуемых конденсаторов: высокочастотный керамический, сегнетокерамический, пленочный полистирольный, пленочный лавсановый, алюминиевый оксидный, танталовый оксидно-полупроводниковый.

Для соединительных элементов производится измерение следующих параметров: R_s и $|Z|$ (в замкнутом состоянии); C_p и G_p (в разомкнутом состоянии). Типы исследуемых элементов: тумблер, геркон, электромагнитное реле.

Установить частоту $f_2 = 1$ МГц и повторить измерения. **Допускается после установки элемента провести измерения его параметров на двух частотах, а затем сменить элемент.**

1.5.4. Снять частотную зависимость $|Z|$ для элементов, указанных преподавателем. Измерения производить в диапазоне частот от 25 Гц до 1 МГц кнопками ◀, ▶ в режиме меню "Част". Выбор схемы измерения устанавливается прибором в автоматическом режиме.

1.5.5. Снять зависимость емкости C_p сегнетокерамического конденсатора от постоянного напряжения. Напряжение смещения изменять в интервале от 0 до 40 В кнопками ◀, ▶ в режиме меню "Смещ". Измерения производить на частоте 1 кГц при двух уровнях переменного напряжения: 40 мВ и 1 В. Повторить эти измерения на частоте 1 МГц.

После окончания измерений и проверки протокола преподавателем установить на дисплее: уровень переменного сигнала частота измерений – 100 Гц; напряжение смещения равно нулю. Выключить тумблер питания. Измеренные элементы должны быть отключены от присоединительного устройства.

1.5.6. В таблицу произвольной формы внести параметры всех элементов, измеренных по п. 1.5.3 для двух частот. Предложить для каждого исследованного элемента эквивалентную схему, учитывающую все составляющие иммитанса.

Построить частотные зависимости $|Z|$ для элементов, исследованных в п. 1.5.4.

Построить зависимость емкости сегнетокерамического конденсатора от постоянного напряжения смещения при двух разных уровнях переменного сигнала (см. п. 1.5.5).

Среди исследованных элементов выбрать те, которые могут быть использованы на высоких частотах. Объяснить свой ответ.

Выполнение разд. 1.5 следует рассматривать как отдельную лабораторную работу.

1.5. Контрольные вопросы и задачи

1. На резисторе нанесена маркировка: Г82К, а на упаковке указано: М1500. Определить номинальное сопротивление этого резистора при температуре 100 °С.

2. Имеются три керамических конденсатора со следующей маркировкой:

а) 1Н1И

б) 15рК

в) $\mu 1M$

Н10

Р100

М1500

Расшифруйте обозначения. Какой из конденсаторов имеет наилучшую температурную стабильность? Можно ли определить, чему будут равны емкости этих конденсаторов при температуре -20 °С? Какие из этих конденсаторов можно применять на высоких частотах?

3. Почему оксидные конденсаторы нельзя применять на высоких частотах?

4. Зачем катушки индуктивности делают секционированными?

5. Какая связь между типом намотки и частотными свойствами конденсаторов спиральной конструкции?

6. В спиральном конденсаторе с безиндукционной намоткой используются две металлизированные полимерные ленты толщиной 50 мкм, шири-

ной 3 см и длиной 5 м. Ширина закраин 1,5 мм, диэлектрическая проницаемость полимера 2,5. Рассчитать емкость конденсатора.

7. Цилиндрический конденсатор изготовлен на диэлектрической трубке из керамики Т-80 длиной 30 мм с наружным диаметром 6 мм и толщиной стенки 600 мкм. Ширина закраин 1,5 мм. Рассчитать емкость конденсатора.

8. Конденсатор с какой маркировкой будет иметь наибольшую удельную емкость при одинаковой толщине диэлектрика: *N150*, *H70*, *P100*, *NP0*?

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ ПОСТОЯННЫХ РЕЗИСТОРОВ

2.1. Основные понятия и определения

Резистором называют элемент электронной аппаратуры, обладающий свойством активного электрического сопротивления. По конструктивному исполнению линейные резисторы (для них соблюдается закон Ома) можно подразделить на проволочные и непроволочные – к ним относятся тонкопленочные резисторы (резистивный элемент – в виде проводящей пленки на диэлектрическом основании) и объемные (резистивный элемент – объемное тело, как правило, с прямоугольным сечением).

В качестве материала резистивного элемента в непроволочных резисторах используются: пленки из пиролитического углерода (углеродистые резисторы); пленки из металла (сплава), оксида металла или смеси металлической и диэлектрической фаз (металлопленочные, металлоокисные и металлодиэлектрические резисторы); пленки и объемные тела, представляющие собой гетерогенную систему из нескольких компонентов, один из которых является проводящим (композиционные резисторы).

Постоянные резисторы имеют фиксированное, заданное при изготовлении сопротивление. В постоянных тонкопленочных резисторах на цилиндрическое основание из керамики или стекла нанесено резистивное покрытие, к которому на торцах присоединяют выводы. Номинальное (расчетное) сопротивление постоянного резистора $R_{\text{ном}}$ зависит от его конструкции, материала и геометрических размеров. Истинное (измеренное) значение сопротивления $R_{\text{изм}}$ может отличаться от номинального в пределах

$$\Delta R_{\text{ном}}/R_{\text{ном}} = (R_{\text{изм}} - R_{\text{ном}})/R_{\text{ном}} \cdot 100\%. \quad (2.1)$$

Номинальные сопротивления и допуски резисторов нормализованы и выбираются из стандартных рядов (см. приложение, табл. П.1 и П.2). Номинальные сопротивления резисторов общего назначения (с допусками $\pm 5\%$; $\pm 10\%$; $\pm 20\%$; $\pm 30\%$) должны соответствовать числам, приведенным в табл. П.1 или

полученным путем умножения этих чисел на 10^n , где $n = 0, \pm 1; 2; 3 \dots$. Обозначения допуска в виде русских или латинских буквенных индексов указаны в табл. П.2. На современных резисторах маркировка номинальных сопротивлений и допусков указывается в виде буквенно-цифрового кода, при котором буква задает порядок номинального сопротивления: Е или R (в латинской транскрипции) – омы; $K(K)$ – килоомы; $M(M)$ – мегаомы; G или G – гигаомы; $T(T)$ – тераомы. При дробных значениях номинальных величин буква, обозначающая единицу измерения, ставится на место запятой, а буквенное обозначение допуска (см. табл. П.2) указывается сразу после кода номинального сопротивления. Например, $R_{\text{ном}} = 6,8 \text{ Ом} \pm 10\%$ кодируется как 6Е8С (русский код) или 6R8K (латинский код); $R_{\text{ном}} = 910 \text{ МОм} \pm 5\%$ – Г91И или G91J и т.п.

Относительное изменение сопротивления резистора при изменении температуры окружающей среды на один градус называется температурным коэффициентом сопротивления α_R или ТКС. Значение и знак ТКС зависят в основном от свойств материала резистивного элемента и могут быть определены из выражения

$$\alpha_R = (1/R) \cdot (dR/dt) \approx (1/R_0) \cdot [(R - R_0)/(t - t_0)] \quad (2.2)$$

где R_0 и R – измеренные сопротивления резистора при температурах t_0 (комнатная температура) и $t > t_0$.

Номинальной мощностью резистора $P_{\text{ном}}$ называют максимально допустимую мощность, которую резистор может длительное время рассеивать при непрерывной электрической нагрузке в заданных условиях, сохраняя параметры в установленных пределах. Значение $P_{\text{ном}}$ зависит от конструкции резистора, его габаритов, а также от физических свойств примененных в нем материалов. Для сравнения между собой по габаритам различных типов резисторов используют такой параметр, как удельная мощность рассеяния резистора – отношение $P_{\text{ном}}$ к площади теплоотдающей (боковой) поверхности S [см²] или к объему резистора V [см³]:

$$p_{\text{уд}}^S = P_{\text{ном}}/S; \quad p_{\text{уд}}^V = P_{\text{ном}}/V. \quad (2.3)$$

Одним из параметров резистора является предельное напряжение $U_{\text{пр}}$ – максимальное напряжение для данного типа резистора, которое устанавливается исходя из его конструкции и геометрических размеров. Значение $U_{\text{пр}}$ определяется в основном электрической прочностью окружающей среды и диэлектрических материалов, примененных в резисторе, поэтому при ис-

пользовании резистора на переменном токе следует учитывать амплитудные значения напряжения.

Максимальное напряжение, которое может быть подано на резистор, не должно превышать напряжения, рассчитанного исходя из номинальной мощности рассеяния и номинального сопротивления (с учетом допуска):

$$U_{\max} = [P_{\text{ном}} (R_{\text{ном}} - \Delta R_{\text{ном}})]^{0.5}, \quad (2.4)$$

или предельного напряжения $U_{\text{пр}}$ (в зависимости от того, какое из этих значений меньше).

2.2. Описание установки

Исследуемые в работе резисторы помещены в пульт. С помощью переключателей образцов $S1$ 1...9 и рода работ $S2$ резисторы могут поочередно подключаться к выходным зажимам пульта, соединяемым с внешним цифровым омметром. При измерениях по п. 2.3.1 положениям переключателя $S1$ соответствуют резисторы, указанные в табл. 2.1.

Резисторы, для которых определяют ТКС (п. 2.3.2), помещены в термостат, расположенный внутри пульта. Типы исследуемых резисторов указаны в табл. 2.2. В пульте имеется прибор, показывающий превышение температуры в термостате относительно комнатной.

При определении допуска резисторов (п. 2.3.4) используют процентный цифровой омметр, снабженный измерительной колодкой для подключения исследуемых резисторов. Измерения проводятся по мостовой двухзажимной схеме с использованием встроенного магазина сопротивлений.

Таблица 2.1

Измерение параметров исследуемых резисторов

Положение переключателя $S1$	Тип резистора	$P_{\text{ном}}$, Вт	$\Delta R_{\text{ном}}$, %	$U_{\text{пр}}$, В	$R_{\text{изм}}$, Ом	Код $R_{\text{ном}}$		U_{max} , В (при 50 Гц)
						Рус.	Лат.	
1	Металлодиэлектрический	0,05	± 10	20				
2	Металлопленочный	0,25	± 5	100				
3	Углеродистый	0,25	± 5	300				
4	Металлоокисный	1	± 5	500				
5	Композиционный объемный	0,5	± 20	500				
6	Композиционный поверхностного типа	0,125	± 30	150				
7	Проволочный	25	± 10	500				

Таблица 2.2

Определение ТКС резисторов

Положение переключателя $S1$	Тип резистора	$t_0 =$	$t =$	ТКС, K^{-1}
		R_0 , Ом	R , Ом	
4	Металлопленочный			
5	Металлоокисный			
6	Углеродистый			
7	Композиционный объемный			

2.3. Проведение испытаний**2.3.1. Определение кода резисторов и максимального напряжения, которое может быть приложено к резистору**

Переключатель рода работ $S2$ установить в положение R . Тумблер НАГРЕВ не включать! Последовательно переключая переключатель $S1$ в положения от 1 до 7, измерить сопротивления резисторов, записывая результаты измерений в табл. 2.1. При этом предел измерения цифрового омметра должен обеспечивать наибольшую точность измерения (все цифры на табло – значащие) и исключать перегрузку прибора.

2.3.2. Определение ТКС резисторов

Включить тумблер СЕТЬ. Переключатель рода работ $S2$ установить в положение $R(T)$. Тумблер НАГРЕВ не включать! Последовательно переключая переключатель $S1$ в положения от 4 до 7, измерить сопротивления резисторов при комнатной температуре t_0 , записывая результаты измерений в табл. 2.2.

Включить тумблер НАГРЕВ. Через 10-15 мин повторно замерить сопротивления резисторов при температуре t (она должна быть в пределах 50-70 °С). Результаты измерений записать в табл. 2.2. Выключить тумблер НАГРЕВ, а затем – тумблер СЕТЬ. Во время повышения температуры можно проводить исследования по п. 2.3.3.

2.3.3. Определение удельной мощности рассеяния резисторов

Для резисторов, выданных преподавателем, записать тип, мощность рассеяния и измерить габариты. Результаты записать в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Определение удельной нагрузки резисторов

Тип резистора	$P_{\text{ном}}$, Вт	Габариты	S , см^2	V , см^3	$P_{\text{уд}}^S$, Вт/ см^2	$P_{\text{уд}}^V$, Вт/ см^3

2.3.4. Определение допуска номинального сопротивления

Включить процентный цифровой омметр. Нажать кнопку "4 заж" и кнопку "20%" на омметре. Получить у преподавателя коробку с исследуемыми резисторами (20 - 25 шт.). С помощью омметра, используемого в п. 2.3.1, измерить сопротивление одного из резисторов, по табл.П.1 определить его $R_{\text{ном}}$ из ряда E24. Установить на встроенном магазине сопротивлений процентного омметра сопротивление в 10 раз большее $R_{\text{ном}}$.

Поочередно подключая исследуемые резисторы к измерительной колодке, измерить $\Delta R_{\text{ном}}$ в процентах, записывая результаты измерений. Если $\Delta R_{\text{ном}}$ хотя бы одного резистора превышает $\pm 5\%$, установить $R_{\text{ном}}$ из ряда E12 и, при несовпадении $R_{\text{ном}}$ с рядом E24, повторить измерения.

2.4. Обработка результатов

1. По данным, полученным в п. 2.3.1, пользуясь табл. П.1 и П.2, определить код номинального сопротивления и допуска резисторов в русской и латинской транскрипциях. Пользуясь выражением (2.4), рассчитать максимальное напряжение, которое может быть приложено к каждому из исследуемых резисторов при частоте 50 Гц. Результаты записать в табл. 2.1.

2. По данным, полученным в п. 2.3.2., пользуясь выражением (2.2), рассчитать ТКС резисторов. Результаты вычислений записать в табл. 2.2.

3. По данным, полученным в п. 2.3.3, пользуясь выражениями (2.3), определить удельные мощности рассеяния резисторов. Результаты записать в табл. 2.3.

4. Построить гистограмму распределения исследованных в п. 2.3.4 резисторов по допуску с точностью $0,1(\Delta R_{\text{ном}} / R_{\text{ном}})$, %. Определить код номинального сопротивления и допуска исследованных резисторов.

2.5. Контрольные вопросы и задачи

1. Вычислить сопротивление резистора поверхностного типа со спиральной нарезкой, если шаг нарезки 1 мм, ширина канавки 0,3 мм, диаметр диэлектрического основания 4,2 мм, расстояние между контактными узлами 10 мм. Удельное сопротивление резистивного слоя равно 1 мкОм.м при толщине 0,1 мкм. Чему равен коэффициент нарезки этого резистора?

2. Резистор с маркировкой G91J используется при комнатной температуре. Чему будет равен уровень собственных шумов этого резистора в диапазоне частот от 50 Гц до 5 кГц при предельном напряжении 120 В,

если уровень токовых шумов равен 8 мкВ/В? Будет ли зависеть напряжение резистора от атмосферного давления?

3. Укажите, какие из следующих кодов $R_{\text{ном}}$ и допуска записаны неправильно: 1RФ; Г51С; 3KK; 4M7C; 220KI. Исправьте ошибки в записи.

4. Изменится ли допустимая мощность рассеяния резистора, если его использовать в аппаратуре, установленной в кабине космического корабля?

5. Вычислить сопротивление резистора поверхностного типа с продольной нарезкой четырех канавок шириной 0,5 мм. Диаметр диэлектрического основания 6 мм, расстояние между контактными узлами 10 мм. Сопротивление квадрата резистивного слоя 100 Ом. Чему равен коэффициент нарезки этого резистора?

6. Чему равно максимально допустимое напряжение при 100 °С для резистора с маркировкой С2-23-1 7Е5И, если его номинальная температура 70 °С, а максимальная температура 125 °С? Принять $\alpha_R \approx 0$.

7. Каков предельно нагруженный номинал резисторов С2-23-0,125, выпускаемых с допуском $\pm 10\%$, если их предельное напряжение равно 40 В?

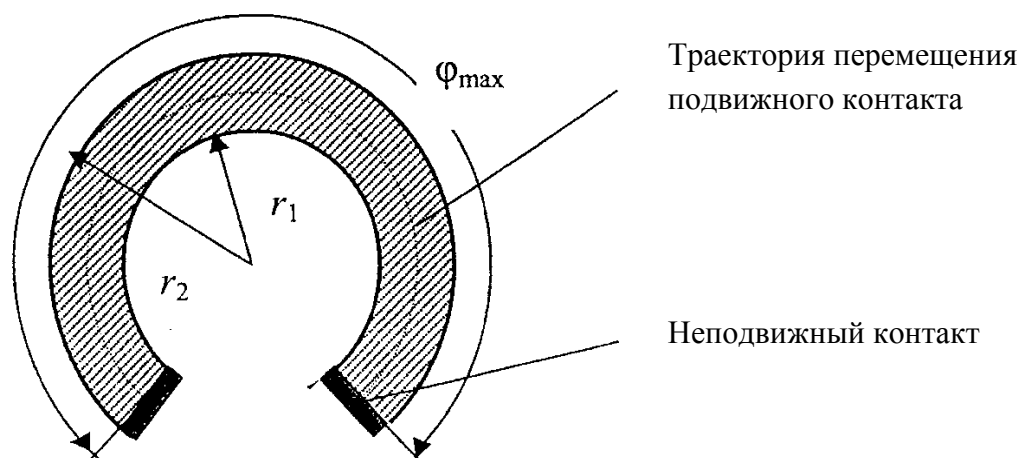
3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕМЕННЫХ РЕЗИСТОРОВ И КОНДЕНСАТОРОВ

3.1. Основные понятия и определения

В процессе настройки, регулировки и эксплуатации аппаратуры возникает необходимость механически изменять сопротивление или емкость в отдельных цепях. Для этих целей используются подстроечные (регулируемые при настройке) и регулировочные или переменные (соединенные с органами управления) резисторы и конденсаторы.

Переменный резистор в общем случае имеет три вывода – два из них закреплены на концах резистивного элемента (неподвижные контакты), а третий – соединен с подвижным контактом, перемещающимся по резистивному элементу. Переменное сопротивление R_ϕ , соответствующее перемещению подвижной части от 0 до ϕ , измеряют между подвижным контактом и одним из неподвижных контактов. Резистивный элемент может быть выполнен в виде подковы (см. рисунок), по которой перемещается подвижный контакт (в этом случае ϕ – угол поворота оси, связанной с подвижным контактом), либо в виде прямоугольника (ϕ – линейное перемещение движка). Известны также многооборотные переменные резисторы, в которых перемещение подвижного контакта осуществляется вращением регулировочного

винта, при этом полный цикл регулирования достигается за несколько десятков оборотов винта.



Конфигурация пленочного резистивного элемента переменного резистора

Основной функциональной характеристикой переменного резистора является закон регулирования – зависимость относительного изменения сопротивления R_φ / R_{\max} от относительного перемещения подвижного контакта φ / φ_{\max} , где φ_{\max} – максимальное перемещение (угловое или линейное) подвижного контакта; R_{\max} – сопротивление резистивного элемента ($R_{\max} = R_\varphi$ при $\varphi = \varphi_{\max}$).

Конструктивно не удастся получить в переменном резисторе нулевое сопротивление при $\varphi = 0$ (оно равно некоторому начальному сопротивлению R_0). Важным параметром переменного резистора является сопротивление начального скачка $R_{\text{нс}}$ – это значение сопротивления, начиная с которого имеет место плавное изменение сопротивления при перемещении подвижного контакта по резистивному элементу.

По характеру закона регулирования переменные резисторы разделяют на линейные и нелинейные (логарифмические, обратнологарифмические, S - образные и т.д.).

Линейный закон регулирования может быть записан в виде

$$R_\varphi = R_{\min} + R_{\max} (\varphi / \varphi_{\max}), \quad (3.1)$$

где $R_{\min} = R_0 + R_{\text{нс}}$.

Часто встречаются резисторы с логарифмическим законом регулирования:

$$R_\varphi = R_{\min} \exp(k\varphi), \quad (3.2)$$

где k – постоянная величина.

При движении подвижного контакта по резистивному элементу в регулируемой цепи переменного резистора возникают шумы скольжения (переменные напряжения помех). Уровень шумов зависит от однородности свойств резистивного элемента и от силы прижима и скорости перемещения подвижного контакта.

Максимальное сопротивление переменного резистора (сопротивление резистивного элемента) называют номинальным сопротивлением, которое обычно выбирают из ряда Е6 (табл.П.1). Для резисторов с угловым перемещением подвижного контакта и пленочным резистивным элементом

$$R_{\max} = R_{\square} (r_2 + r_1) / (r_2 - r_1) \cdot (\pi \varphi_{\max}) / 360, \quad (3.3)$$

где R_{\square} – сопротивление квадрата резистивной пленки, r_1 и r_2 – внутренний и наружный радиусы резистивного элемента (см. рисунок), φ_{\max} – угол (в градусах) между контактами резистивного элемента.

В большинстве переменных и подстроечных конденсаторов регулирование емкости обеспечивается изменением площади перекрытия обкладок. Одна обкладка (или система обкладок) находится на вращающейся части конденсатора (ротор), а другая (статор) – неподвижна.

В качестве переменных конденсаторов чаще всего используются воздушные многопластинчатые конденсаторы, в которых при повороте ротора от $\varphi = 0$ до $\varphi_{\max} \leq 180^\circ$ емкость изменяется от C_{\min} до C_{\max} . В них возможно получение линейного и нелинейного законов регулирования емкости. В линейных конденсаторах пластины имеют форму полукруга, нелинейные законы регулирования задаются переменным радиусом роторных пластин.

Практически все подстроечные конденсаторы – керамические. Они содержат роторный диск, изготовленный из конденсаторной керамики, на который нанесен электрод в виде сектора с углом θ_p , и статор, изготовленный из установочной керамики с электродом в виде полукруга или сектора с углом $\theta_c \geq \theta_p$. Ротор может занимать любое положение относительно статора, т.е. угол φ может изменяться от 0 до 360° (при этом $C_0 = C_{360}$).

Температурная стабильность подстроечных конденсаторов и резисторов характеризуются значениями α_C , α_R , определяемыми из выражений (1.1) и (2.2).

3.2. Описание установки

Все исследуемые резисторы и конденсаторы находятся внутри лабораторного пульта. Их органы управления (оси и движки) выведены наружу.

Всего на передней панели пульта закреплены 6 резисторов, перечисленных в табл. 3.1 (их номера соответствуют положениям переключателя объектов измерений), воздушный переменный и керамический подстроечный конденсаторы. В термостате, расположенном внутри пульта, размещены 2 подстроечных композиционных резистора и подстроечный керамический конденсатор, для которых установлены значения R_{\max} и C_{\max} .

Таблица 3.1

Свойства исследуемых переменных резисторов

Номер резистора	Наименование Резистора	Характер управления подвижным контактом	Закон регулирования
1	Композиционный поверхностный	Вращение оси	Нелинейный
2	- " -	- " -	- " -
3	- " -	Многооборотный ($n = 30$)	Линейный
4	Проволочный	Вращение оси	- " -
5	Композиционный объемный	- " -	- " -
6	Композиционный поверхностный	Линейное перемещение движка	- " -

К гнездам ИЗМЕРЕНИЕ пульта подключается цифровой вольтфарадаомметр. Переключатели РЕЖИМ ИЗМЕРЕНИЙ и ОБЪЕКТ ИЗМЕРЕНИЙ служат для поочередного подсоединения всех исследуемых элементов.

3.3. Проведение испытаний

3.3.1. Определение функциональных характеристик резисторов

Включить цифровой вольтфарадаомметр, установить на нем режим измерения сопротивлений. Убедиться, что тумблеры СЕТЬ и ТЕРМОСТАТ на пульте выключены. Переключатель РЕЖИМ ИЗМЕРЕНИЙ на пульте поставить в положение "R", переключатель ОБЪЕКТ ИЗМЕРЕНИЙ – в положение "1". Замерить сопротивление резистора R_1 при крайнем левом положении регулировочной оси, полученное значение R_0 записать в табл. 3.2. Сдвинув ось, определить $R_{\text{нс}}$ и записать его значение в табл. 3.2. Вращая ось, измерить значения R_φ при различных углах поворота φ , записывая их в таблицу произвольной формы. При крайнем правом положении оси определить значения R_{\max} и φ_{\max} (записать их в табл. 3.2).

Повторить измерения для резисторов $R_2 \dots R_6$. Перемещения φ для различных резисторов следует указывать в градусах, числе оборотов или единицах линейного перемещения органа управления, обязательно отмечая значение φ_{\max} .

Таблица 3.2

Параметры исследуемых переменных резисторов

Номер резистора	R_0 , Ом	$R_{ис}$, Ом	R_{min} , Ом	R_{max} , Ом	φ_{max}

Для резисторов с линейным законом регулирования достаточно определить 5-6 точек, а для нелинейных законов – 8-10 точек в пределах регулирования от $\varphi = 0$ (при $R_\varphi = R_{min}$) до φ_{max} . Следует устанавливать предел измерений цифрового омметра, обеспечивающий получение максимальной точности.

3.3.2. Определение параметров пленочного резистивного элемента переменного резистора

Для композиционного резистора, полученного у преподавателя, измерить геометрические размеры резистивного элемента (см. рисунок). Подключить неподвижные контакты резистора к омметру и измерить R_{max} .

Убедиться, что исследуемый резистор имеет линейную функциональную характеристику. Для этого установить подвижный контакт в среднее положение и измерить сопротивления R_1 и R_2 между подвижным контактом и каждым из неподвижных контактов. При линейной характеристике регулирования $R_1 \approx R_2$. Результаты записать в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Параметры композиционного пленочного резистивного элемента

$D_1 = 2r_1$, мм	$D_2 = 2r_2$, мм	φ_{max} , град	R_{max} , Ом	R_1 , Ом	R_2 , Ом	R_{\square} , Ом	$R_{ном}$, Ом

3.3.3. Определение функциональных характеристик переменных конденсаторов

Установить на цифровом вольтфарадометре режим измерения емкостей (предел – "100 pF"), при этом вход " * " прибора должен быть соединен с гнездом " \perp " пульта. Переключатель РЕЖИМ ИЗМЕРЕНИЙ на пульте поставить в положение "С", переключатель ОБЪЕКТ ИЗМЕРЕНИЙ – в положение "6". При этом производится измерение емкости соединительных проводников C_0 .

Переключатель объекта измерений установить в положение "1" – при этом испытывается воздушный переменный конденсатор. При крайнем левом

положении оси ротора ($\varphi = 0$) определить минимальную емкость C_{\min} конденсатора как $C_{\min} = C_{\text{изм}} - C_0$, где $C_{\text{изм}}$ – показания прибора.

Вращая ось ротора, измерить 5-6 значений C_φ (учитывать C_0 !) при различных углах поворота φ . При крайнем правом положении оси определить значения C_{\max} и φ_{\max} . Результаты измерений записать в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Параметры исследуемых переменных конденсаторов

Угловое перемещение φ , град.	Тип конденсатора			
	Воздушный переменный		Керамический подстроечный	
	$C_{\text{изм}}$, пФ	C_φ , пФ	$C_{\text{изм}}$, пФ	C_φ , пФ

Повторить измерения для подстроечного керамического конденсатора (положение "2" переключателя ОБЪЕКТ ИЗМЕРЕНИЙ).

3.3.4. Исследование температурной стабильности переменных конденсаторов и резисторов

Установить на цифровом приборе режим измерения сопротивлений. Переключатель РЕЖИМ ИЗМЕРЕНИЙ пульта поставить в положение " $R(T)$, $C(T)$ " пульта, переключатель ОБЪЕКТ ИЗМЕРЕНИЙ в положение 3. Измерить сопротивление резистора при комнатной температуре. В положении 4 переключателя измерить этот параметр для другого резистора. Переключить прибор в режим измерения емкостей и в положении 5 переключателя ОБЪЕКТ ИЗМЕРЕНИЙ измерить (с учетом C_0) емкость керамического подстроечного конденсатора при комнатной температуре. Включить на пульте тумблер ТЕРМОСТАТ и с помощью потенциометра РЕГУЛИРОВКА ТЕМПЕРАТУРЫ обеспечить нагрев термостата до температуры 60-70 °С. Измерить при этой температуре сопротивления и емкость исследуемых элементов.

Выключить тумблеры ТЕРМОСТАТ и СЕТЬ пульта.

3.4. Обработка результатов

1. Пользуясь данными п. 3.3.1, построить зависимости $R_\varphi/R_{\max}=f(\varphi/\varphi_{\max})$ для всех исследованных резисторов.

Для резисторов с линейным законом регулирования определить точность соблюдения закона (в процентах).

Для резистора с логарифмическим законом регулирования определить постоянную k в выражении (3.2).

2. По результатам измерений, полученных в п. 3.3.2, пользуясь выражением (3.3), рассчитать сопротивление квадрата пленочного резистивного элемента. Определить номинальное сопротивление исследованного резистора (см. табл.П.1). Результаты записать в табл. 3.3.

3. Пользуясь данными п. 3.3.3, построить зависимости $C_\varphi = f(\varphi)$ для воздушного и керамического конденсаторов. Определить точность соблюдения закона регулирования.

По зависимости $C_\varphi = f(\varphi)$ для подстроечного керамического конденсатора определить θ_c и θ_p .

4. Пользуясь данными п.3.3.4, рассчитать температурные коэффициенты сопротивления двух исследованных резисторов и температурный коэффициент емкости конденсатора. При расчете использовать выражения (1.1) и (2.2).

3.5. Контрольные вопросы и задачи

1. Какая существует связь между номинальным сопротивлением переменного резистора и сопротивлением начального скачка?

2. В переменном резисторе резистивный элемент состоит из 4 участков, для которых выполняется условие $R_{\square 1} > R_{\square 2} > R_{\square 3} > R_{\square 4}$. Изобразить (качественно) закон регулирования для этого резистора.

3. Переменный резистор с логарифмическим законом регулирования имеет номинальное сопротивление 150 Ом. Определить сопротивление между подвижным контактом и каждым из неподвижных контактов при среднем положении подвижного контакта. Сопротивление начального скачка 15 Ом, начальным сопротивлением пренебречь.

4. Постройте (качественно) зависимость переменной емкости подстроечного керамического конденсатора от угла поворота оси при изменении его от 0 до 360°, если $\theta_c = 120^\circ$, а $\theta_p = 90^\circ$.

5. Можно ли по внешнему виду воздушного переменного конденсатора судить о законе регулирования емкости в нем?

4. ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ РЕЗИСТОРОВ

4.1. Основные понятия и определения

Характерной особенностью полупроводниковых материалов является сильная зависимость их проводимости от различных внешних факторов (температуры, освещенности, напряженности электрического и магнитного

полей, давления и т. п.). Это позволяет создавать на основе полупроводников датчики внешних энергетических воздействий. В данной работе исследуются датчики температуры – терморезисторы и напряженности электрического поля – варисторы.

Терморезистор – это резистор, в котором используется зависимость электрического сопротивления от температуры. Все полупроводниковые терморезисторы можно разделить на термисторы – полупроводниковые терморезисторы с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления, и позисторы – полупроводниковые терморезисторы с положительным температурным коэффициентом сопротивления.

Основная часть термисторов изготовлена из оксидных полупроводников – оксидов металлов переходной группы таблицы Д.И. Менделеева (от титана до цинка). Электропроводность оксидных полупроводников с преобладающей ионной связью отличается от электропроводности классических ковалентных полупроводников. Для металлов переходной группы характерны незаполненные электронные оболочки и переменная валентность. В результате электропроводность таких оксидов связана с обменом электронами между соседними ионами. Энергия, необходимая для стимулирования такого обмена, экспоненциально уменьшается с увеличением температуры. Таким образом, температурная зависимость сопротивления термистора из оксидного полупроводника может быть аппроксимирована уравнением, характерным для классических ковалентных полупроводников:

$$R = R_{\infty} \exp(B/T),$$

где R_{∞} – коэффициент, зависящий от исходного материала и конструкции термистора; B – коэффициент температурной чувствительности, T – абсолютная температура термистора. Аналогично, температурная зависимость проводимости термистора может быть аппроксимирована уравнением

$$\sigma = \sigma_{\infty} \exp(-B/T), \quad (4.1)$$

где σ_{∞} – коэффициент, характерный для данного термистора. Это уравнение после логарифмирования имеет вид линейной зависимости

$$\ln \sigma = \ln \sigma_{\infty} - (B/T). \quad (4.2)$$

Коэффициент температурной чувствительности B для оксидных полупроводников отражает интенсивность обмена электронами между соседними ионами, а для ковалентных полупроводников – интенсивность ионизации атомов с увеличением температуры. Значение коэффициента температурной

чувствительности в соответствии с уравнением (4.2) может быть определено экспериментально по двум значениям проводимости термистора при температурах T_1 и T_2 :

$$B = (\ln \sigma_2 - \ln \sigma_1) / [(1/T_1) - (1/T_2)] = [\ln(\sigma_2/\sigma_1)] / [(1/T_1) - (1/T_2)]. \quad (4.3)$$

Принцип действия позисторов, которые состоят из титаната бария с различными примесями, связан с фазовым переходом из сегнетоэлектрического в параэлектрическое состояние. Переход из одной фазы в другую происходит в узком интервале температур с резким увеличением удельного сопротивления материала позистора при увеличении температуры.

Варистор – это полупроводниковый резистор, сопротивление которого зависит от приложенного напряжения. В лабораторной работе исследуется варистор, изготовленный методом керамической технологии из порошкового карбида кремния со связкой. Нелинейность вольт-амперной характеристики (ВАХ) таких варисторов обусловлена явлениями на точечных контактах между кристаллами карбида кремния. При относительно больших напряжениях на варисторе и соответственно при относительно больших токах, проходящих через варистор, разогрев точечных контактов приводит к уменьшению их сопротивления и к нелинейности ВАХ варистора. Этот механизм является основным при относительно больших напряжениях на варисторе. Малые объемы активных областей под точечными контактами между кристаллами обеспечивают очень малую тепловую инерционность этих областей. Поэтому варисторы обладают нелинейной ВАХ и при переменном напряжении, чем варисторы существенно отличаются от термисторов.

Вольт-амперная характеристика варистора соответствует уравнению $I = AU^\beta$, где A – коэффициент, значение которого зависит от типа варистора, β – коэффициент нелинейности варистора.

4.2. Описание установки

Статические ВАХ термистора и позистора (зависимость напряжения на термисторе от тока или тока от напряжения на позисторе при тепловом равновесии с окружающей средой) исследуют с помощью установки, схема которой показана на рис. 4.1. Напряжения и токи регистрируют стрелочным измерительным прибором, работающим в режиме измерения напряжения или тока.

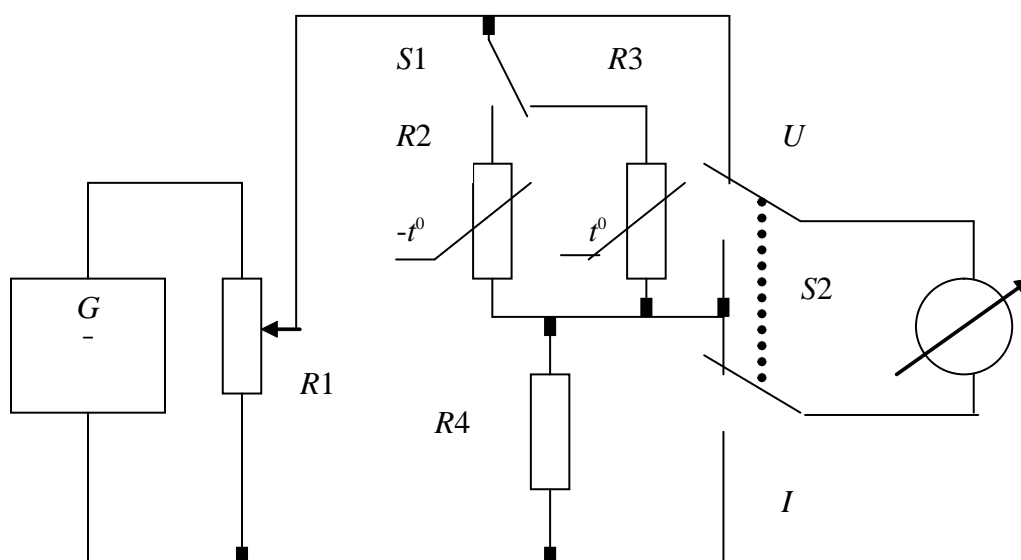


Рис. 4.1. Схема для исследования статических ВАХ термистора и позистора

Исследование зависимости сопротивлений термистора R_2 и позистора R_3 от температуры проводят, нагревая исследуемые резисторы в термостате и измеряя их сопротивление внешним цифровым омметром.

Исследование динамической ВАХ варистора проводят с помощью осциллографической схемы, приведенной на рис. 4.2. На пластины вертикального отклонения осциллографа подается напряжение с резистора R_6 , пропорциональное току через варистор. Одновременно на пластины горизонтального отклонения подается напряжение с делителя напряжения $R_7 - R_8$, пропорциональное напряжению на варисторе (с соотношением 1:10). Таким образом, на экране осциллографа получается ВАХ варистора, так как сопротивление R_6 много меньше сопротивления варистора.

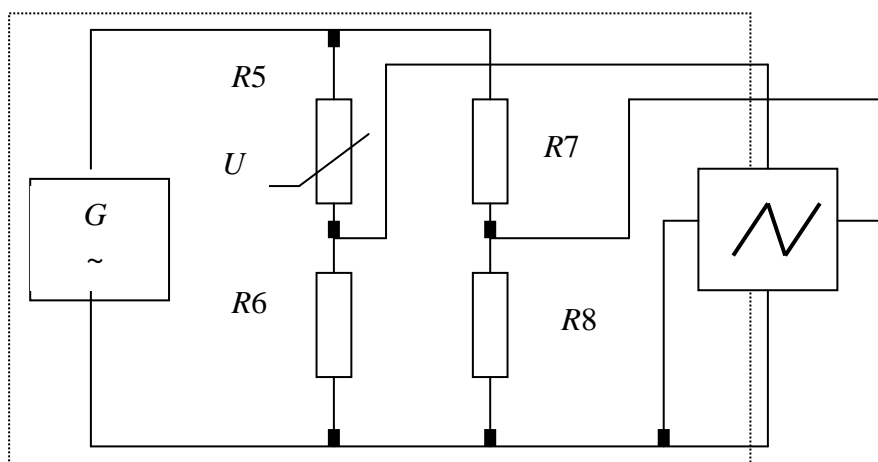


Рис. 4.2. Схема для исследования ВАХ варистора

4.3. Проведение испытаний

4.3.1. Исследование статических ВАХ термистора и позистора

Переключатель рода работ пульта поставить в положение ТЕРМИСТОР. Устанавливая различные значения тока через термистор (от нуля до 15 мА), измерять напряжение на термисторе после установления теплового равновесия между термистором и окружающей средой, т.е. регистрируя установившиеся показания приборов. Для изменения режима измерения тока и напряжения использовать переключатель " $I - U$ ".

В положении переключателя рода работ ПОЗИСТОР устанавливать различные напряжения на позисторе (от нуля до 20 В) и измерять ток через позистор после установления теплового равновесия между позистором и окружающей средой.

4.3.2. Исследование динамической ВАХ варистора при комнатной температуре

Для исследования ВАХ варистора надо: переключатель рода работ пульта поставить в положение ВАРИСТОР, установить на осциллографе переключатели входов и синхронизации в положение "X-Y", переключатели типа входного сигнала – в положение " \approx ". Подбрав масштабы по осям таким образом, чтобы ВАХ имела размах 6-7 клеток по обеим осям, зарисовать осциллограмму и записать масштабы. В дальнейшем при обработке экспериментальных результатов учитывать, что напряжение, подаваемое на осциллограф, снималось с делителя 1:10, а ток регистрировался путем измерения напряжения на резисторе с сопротивлением 100 Ом.

4.3.3. Осциллографирование зависимостей от времени тока через варистор и напряжения на нем

Установить осциллограф в режим временной развертки и включить внутреннюю синхронизацию (нажать кнопки "1", "+" и "..."). Зарисовать осциллограммы.

4.3.4. Исследование температурных характеристик термистора и позистора

В положениях переключателя рода работ ТЕРМИСТОР и ПОЗИСТОР измерить с помощью внешнего омметра сопротивления исследуемых резисторов при комнатной температуре. Включить термостат тумблером

НАГРЕВ на пульте и, регулируя скорость нагрева, поочередно измерить сопротивления термистора и позистора при 6-7 значениях температуры от 20 до 80-100 °С. Результаты занести в таблицу, где индекс "1" относится к термистору, а "2" – к позистору.

Температурные характеристики термистора и позистора

$t, ^\circ\text{C}$	T, K	$1/T, \text{K}^{-1}$	$R_1, \text{Ом}$	$R_2, \text{Ом}$	$\sigma_1, \text{мкСм}$	$\ln \sigma_1$

4.3.5. Исследование ВАХ варистора при высокой температуре

При достижении в термостате температуры 80-100°С провести исследование ВАХ варистора в соответствии с п. 4.3.2. Зарисовать осциллограмму ВАХ варистора при высокой температуре на той же кальке, где была зарисована ВАХ при комнатной температуре.

4.4. Обработка результатов

4.4.1. Построить статические ВАХ термистора $U(I)$ и позистора $I(U)$ по данным п. 4.3.1. По данным таблицы построить зависимость сопротивления позистора от температуры.

По экспериментальным данным той же таблицы построить температурную характеристику термистора, откладывая по оси абсцисс $1/T$, а по оси ординат – значения проводимости в логарифмическом масштабе.

Определить коэффициент температурной чувствительности термистора, подставив в уравнение (4.3) значения проводимости термистора при двух любых температурах. Эти значения проводимости и температуры должны соответствовать усредненной зависимости (прямая линия) $\ln \sigma_1 = f(1/T)$, а не табличным данным.

4.4.2. По осциллограмме ВАХ варистора вычислить коэффициент нелинейности варистора при комнатной температуре по формуле

$$\beta = R / r = (U / I) (dI / dU),$$

где R и r – соответственно статическое и дифференциальное сопротивления варистора.

Дифференциальное сопротивление определить путем построения прямоугольного треугольника на касательной к ВАХ варистора в выбранной рабочей точке А на участке наибольшей нелинейности (рис. 4.3).

4.4.3. По осциллограммам ВАХ варистора при разных температурах (рис. 4.3) вычислить температурные коэффициенты сопротивления варистора при неизменном напряжении и неизменном токе по формулам:

$$\text{TKR}|_{U=\text{const}} = (1/R) \cdot (R' - R) / (T_2 - T_1); \text{TKR}|_{I=\text{const}} = (1/R) \cdot (R'' - R) / (T_2 - T_1),$$

где R , R' и R'' – статические сопротивления, соответствующие различным токам и напряжениям.

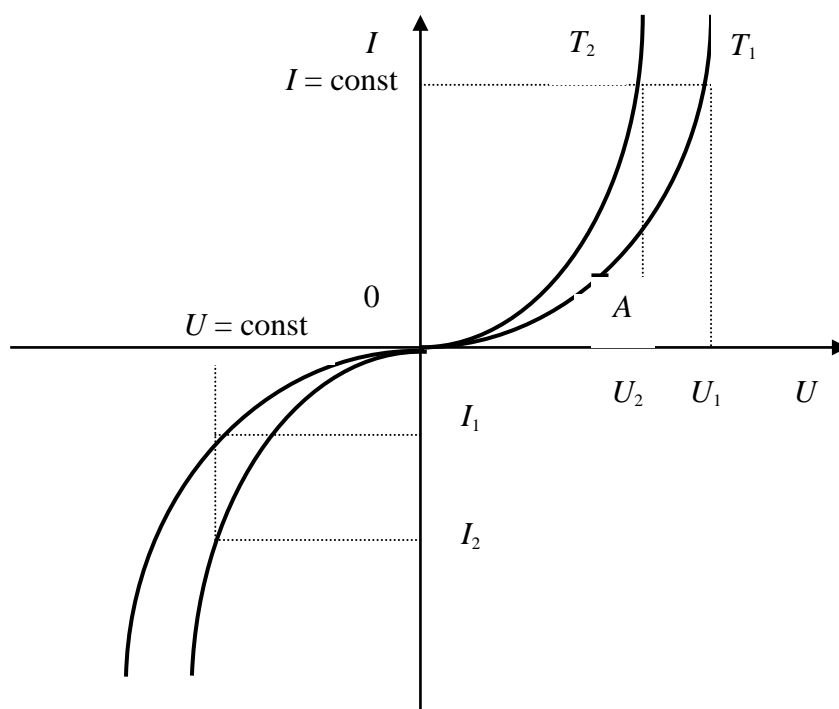


Рис. 4.3. Вольт-амперные характеристики варистора при разных температурах ($T_2 > T_1$)

4.5. Контрольные вопросы и задачи

1. Какова физическая основа работы термисторов и позисторов? Как объяснить статические ВАХ термистора и позистора?
2. Какие физические процессы могут приводить к нелинейности ВАХ варистора? Каковы основные свойства и параметры варисторов?
3. Почему при исследовании статической ВАХ термистора правильнее и удобнее изменять ток через термистор, а измерять напряжение на термисторе? При исследовании статической ВАХ позистора, наоборот, правильнее и удобнее изменять напряжение на позисторе, а измерять ток через позистор. Почему?
4. Укажите области применения терморезисторов (термисторов и позисторов) и варисторов. Из каких материалов их изготавливают?

5. В позисторе косвенного подогрева используется титанат бария с точкой Кюри $120\text{ }^{\circ}\text{C}$. Какой ток должен протекать по нагревателю с сопротивлением $50\text{ }\Omega$, если коэффициент рассеяния позистора равен $0,02\text{ Вт/К}$?

6. Коэффициент температурной чувствительности термистора равен 1000 К . В рабочем режиме температурный коэффициент сопротивления термистора равен $-0,01\text{ 1/К}$, при этом в нем рассеивается мощность 1 Вт . Определить коэффициент рассеяния термистора.

5. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ГИБРИДНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

5.1. Основные понятия и определения

Интегральная микросхема (ИМС) – это микроэлектронное изделие, выполняющее определенную функцию преобразования, обработки и (или) накопления информации и имеющее высокую плотность упаковки электрически соединенных элементов, которое с точки зрения требований к испытаниям, приемке и эксплуатации рассматривается как единое целое.

По конструктивно-технологическому признаку различают полупроводниковые и гибридные ИМС. Для их изготовления используют полупроводниковую и пленочную технологии. Сущность первой заключается в локальной обработке участков полупроводникового кристалла и придании им свойств, присущих отдельным элементам и их соединениям. Вторая основана на использовании послойного нанесения пленок различных материалов на общее основание (подложку) при одновременном формировании из них элементов и их соединений. Комбинация двух металлических пленок, между которыми расположена диэлектрическая пленка, образует пленочный интегральный конденсатор. Пленочные интегральные резисторы, имеющие форму прямоугольника или змейки (меандра), изготавливают из проводникового материала с высоким удельным сопротивлением.

Существенным недостатком пленочной технологии является невозможность изготовления активных элементов схемы. Поэтому ИМС, изготовленные по пленочной технологии, содержат пленочные интегральные пассивные элементы (резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности) и навесные (дискретные) активные элементы (транзисторы, диоды и бескорпусные кристаллы полупроводниковых микросхем), изготовленные по полупроводниковой технологии. Таким образом, в одной ИМС реализуется гибрид двух технологий, откуда и название такого типа схем. Необходимость использования

навесных активных компонентов в гибридных ИМС позволяет применять в них и навесные пассивные компоненты (конденсаторы и катушки индуктивности) больших номиналов, которые невозможно изготовить по пленочной технологии. Однако использование навесных компонентов и необходимость их соединения между собой с помощью пленочных проводников существенно снижают надежность гибридных ИМС (по сравнению с полупроводниковыми) и увеличивают габариты.

Миниатюризация ИМС количественно характеризуется степенью интеграции микросхемы (k) и плотностью упаковки элементов (N). Степень интеграции определяется числом элементов микросхемы. При $n < 10$ степень интеграции $k = 1$, при $10 < n < 100$ $k = 2$, при $100 < n < 1000$ $k = 3$. Плотность упаковки N определяется числом элементов микросхемы, приходящихся на 1 см^2 поверхности подложки или кристалла.

Гибридные ИМС, в свою очередь, разделяются на тонкопленочные (толщина пленок менее 1 мкм) и толстопленочные. При этом принципиальным является не столько количественное, сколько качественное различие, определяемое технологией изготовления пленок. Тонкопленочные элементы формируют, как правило, с помощью термического вакуумного испарения и ионного распыления, а толстопленочные элементы наносят на подложку методом трафаретной печати с последующим вжиганием. Качество тонкопленочных элементов оказывается выше, однако относительная простота технологии толстопленочных элементов и невысокие первоначальные затраты при организации производства определяют широкое использование таких ИМС в специализированных устройствах.

5.2. Описание установки

Установка для исследований состоит из двух стереоскопических микроскопов типа МБС-9 и прибора для измерения сопротивлений. Некоторые из исследуемых ИМС расположены на вращающемся предметном столе микроскопа, другие находятся в защитных чехлах с прозрачной крышкой (их выдает преподаватель). Выводы одной из ИМС соединены с контактами на основании микроскопа.

Микроскоп МБС-9 предназначен для наблюдения объемных предметов как при искусственном, так и при естественном освещении. При использовании окуляров "8×" микроскоп позволяет получить увеличение от 4,8 до 56,9 крат в зависимости от положения переключателя увеличений (0,6; 1; 2; 4

или 7). Один из окуляров имеет шкалу, позволяющую измерить линейные размеры объекта, и диоптрийную наводку. Для измерения линейных размеров вначале, вращая диоптрийное кольцо, необходимо добиться резкого изображения шкалы, а затем поворотом рукоятки механизма фокусировки микроскопа добиться резкого изображения объекта. Цена деления шкалы составляет 0,1 мм при положении переключателя увеличений "1" и изменяется соответственно при изменении увеличения ("2" – 0,05 мм; "4" – 0,025 мм; "7" – 0,014 мм).

Улучшает просмотр топологии гибридных ИМС применение компьютерных WEB-камер типа Logitech. При наличии в компьютере программного обеспечения Logitech Vid HD появляется возможность вывода изображения структуры ИМС на экране монитора. В лабораторной работе используется камера Vebcam C210, располагаемая на поверхности одного из окуляров микроскопа МБС-9.

5.3. Проведение испытаний

5.3.1. Изучение конструкции гибридной ИМС

Включить осветитель микроскопа. Установить переключатель увеличений в положение "0,6" или "1" и поворотом рукоятки механизма фокусировки добиться резкого изображения гибридной ИМС. Рассмотреть конструкцию каждой гибридной ИМС, расположенной на вращающемся предметном столе микроскопа или выданной преподавателем. Найти пленочные и навесные элементы.

Таблица 5.1

Количество элементов в исследуемых ИМС

Тип ИМС	Площадь подложки	Количество элементов				Общее число элементов	Степень интеграции	Плотность упаковки
		активных элементов	навесных конденсаторов	пленочных резисторов	пленочных конденсаторов			

Записать в табл. 5.1 для каждой микросхемы количество навесных активных элементов, навесных конденсаторов, а также количество пленочных резисторов и конденсаторов и размеры подложки.

5.3.2. Изучение топологии гибридной ИМС

Зарисовать расположение элементов и соединительных проводников на подложке для одной из исследованных ИМС (по указанию преподавателя).

Пользуясь принципиальной схемой ИМС, указать на эскизе топологии все ее элементы.

5.3.3. Измерение параметров пленочных пассивных элементов гибридной ИМС

Пользуясь полученным эскизом топологии и принципиальной схемой ИМС, определить резисторы, сопротивления которых можно измерить на внешних выводах микросхемы. Произвести измерения и результаты записать в табл.5.2.

Таблица 5.2

Параметры пленочных резисторов

Резистор	Номера выводов ИМС	Сопротивление R , Ом	Длина, мм	Ширина, мм	Коэффициент формы	Поверхностное сопротивление резистивного слоя

Для каждого резистора с помощью шкалы окуляра микроскопа или камеры измерить длину и ширину резистивного слоя.

Для одной из исследованных микросхем (по указанию преподавателя) измерить линейные размеры ($A \times B$) входящих в нее пленочных конденсаторов. Результаты измерений записать в табл. 5.3.

Таблица 5.3

Параметры пленочных конденсаторов

Конденсатор	A , мм	B , мм	Площадь, мм ²	Емкость, пФ	Удельная емкость, пФ/мм ²

Пользуясь принципиальной схемой ИМС, определить емкости конденсаторов или узнать их значения у преподавателя.

5.4. Обработка результатов

5.4.1. По данным, полученным при изучении конструкции микросхем, рассчитать степень интеграции микросхемы (k) и плотность упаковки элементов (N). Результаты расчета занести в табл. 5.1.

5.4.2. Рассчитать удельное поверхностное сопротивление резистивного слоя для каждого исследованного резистора. Сопротивление резистивного слоя (измеренное сопротивление резистора) $R = \rho_v l/(db)$, где ρ_v –

удельное объемное сопротивление слоя; l – длина слоя; d – толщина; b – ширина.

Удельное поверхностное сопротивление слоя (или сопротивление квадрата пленки R_{\square}) толщиной d вводится как $\rho_s = \rho/d$. Тогда $R = \rho_s l/b$, где l/b – коэффициент формы. Отсюда $\rho_s = R b/l = R_{\square}$.

5.4.3. По данным измерения линейных размеров пленочных конденсаторов рассчитать удельную емкость для данной конструкции: $C_{уд} = C/S$.

5.4. 4. Топологию интегральной микросхемы представить в виде цветного эскиза с указанием всех элементов микросхемы.

5.5. Контрольные вопросы и задачи

1. Перечислите основные технологические приемы, используемые в производстве гибридных ИМС. Почему в гибридных ИМС появляется необходимость использования навесных компонентов?

2. В чем преимущества гибридных ИМС по сравнению с полупроводниковыми? В чем недостатки?

3. Пленочный резистор имеет форму прямоугольника размерами 1 на 2 мм. Его сопротивление при напряжении, приложенном в продольном направлении, составляет 100 Ом. Определить сопротивление квадрата пленки, а также сопротивление резистора в поперечном направлении.

4. Какими свойствами должны обладать материалы, из которых изготовлены пленочные резисторы и конденсаторы, чтобы габариты ИМС были минимальными?

6. ИССЛЕДОВАНИЕ КАТУШЕК ИНДУКТИВНОСТИ НА ФЕРРИТОВЫХ СЕРДЕЧНИКАХ

6.1. Основные понятия и определения

Катушка индуктивности конструктивно реализуется в виде однослойной или многослойной обмотки из изолированного провода, которая наматывается на магнитный сердечник или изоляционное основание. По форме катушки индуктивности могут быть трех видов: цилиндрическая катушка или соленоид (сердечник – магнитный стержень); катушка на сердечнике с замкнутым магнитным потоком (тороидальный, броневого, Ш- или П-образный сердечники); плоская катушка (спираль с планарно расположенными витками, сер-

дечник – магнитный диск). Индуктивность катушек первых двух видов может быть определена из выражения

$$L = k_{\Phi} \mu_0 \mu_c w^2 S_c / l_c, \quad (6.1)$$

где $k_{\Phi} \leq 1$ – коэффициент формы; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; μ_c – магнитная проницаемость сердечника; w – число витков обмотки; S_c – сечение сердечника; l_c – средняя длина магнитных силовых линий в сердечнике.

Наименьшими габаритами при одинаковой индуктивности обладают тороидальные катушки, параметры которых хорошо поддаются расчету, так как для них $k_{\Phi} = 1$, $\mu_c = \mu$, где μ – магнитная проницаемость материала сердечника. Напряженность магнитного поля в тороидальном сердечнике находится как $H = I w / l_c$, где I – ток в обмотке.

Характеристики тороидальных катушек индуктивности определяются свойствами материала магнитного сердечника. При использовании катушек на частотах выше 100 кГц их сердечники изготавливаются из ферритов – магнитных полупроводниковых керамических материалов.

Магнитомягкие ферриты, обладающие достаточно большой магнитной проницаемостью и малой коэрцитивной силой, применяются в качестве материалов для изготовления сердечников любой формы, они имеют невысокую стоимость. Достоинством их по сравнению с металлическими магнитными сердечниками является также большое удельное сопротивление ρ , что препятствует индуцированию вихревых токов. Поэтому в широком диапазоне частот магнитная проницаемость ферритов μ остается постоянной, а потери энергии практически обусловлены только потерями на гистерезис. Спад магнитной проницаемости феррита при частотах выше некоторого критического значения $f_{кр}$ обуславливается в основном инерционностью процессов перемагничивания. На высоких частотах уменьшение μ будет определяться также влиянием вихревых токов. В маркировке поликристаллических ферритов число означает величину начальной магнитной проницаемости при низких частотах; первая буква Н – "низкочастотный"; вторая буква указывает состав феррита: М – в состав входит оксид марганца, Н – оксид никеля.

В настоящей работе проводится исследование свойств тороидальных катушек индуктивности на ферритовых сердечниках кольцевой формы. Размеры таких сердечников принято записывать в форме: $KD \times d \times h$, где буква К означает кольцевой; D , d , h – численные значения (в миллиметрах) наружного диаметра, внутреннего диаметра и толщины кольца соответственно.

6.2. Описание установки

Схема измерительной установки приведена на рисунке. Синусоидальное напряжение от генератора сигналов G подается с помощью переключателя $S1$ на одну из испытуемых катушек индуктивности L и последовательно соединенный с ней резистор $R_0 = 51,4$ Ом. Вольтметр PU , в зависимости от положения переключателя $S2$, может измерять напряжение U_R на резисторе R_0 , пропорциональное току I через обмотку и, соответственно, напряженности магнитного поля H , воздействующего на сердечник, или напряжение U_{BX} на входе схемы.

Падение напряжения на катушке индуктивности можно найти как

$$U_L = (U_{BX}^2 - U_R^2)^{0.5} = 2\pi f I L, \quad (6.2)$$

где $I = U_R / R_0$ – ток в обмотке, L – индуктивность катушки.

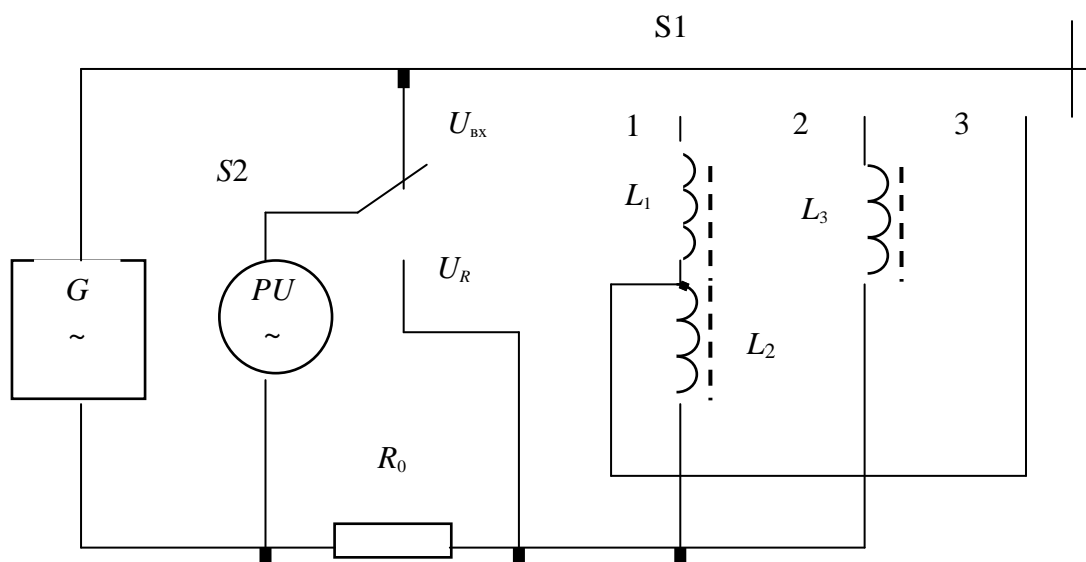


Схема для измерения токовой и частотной зависимостей индуктивности катушек

Параметры катушек, используемых при определении токовых (полевых) и частотных зависимостей свойств, приведены в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Параметры исследуемых катушек

Исследуемая зависимость	Положение переключателя $S1$	Катушка	Марка феррита	$D \times d \times h$, мм	w
$L(I)$	1	$L_1 + L_2$	2000НМ	7 x 4 x 2	40
$\mu(H)$	2	L_3	20000НМ	10 x 6 x 3	40
$L(f)$	3	L_2	2000НМ	7 x 4 x 2	20
$\mu(f)$	2	L_3	20000НМ	10 x 6 x 3	40

Внутри пульта также находятся образцы исследуемых сердечников, на каждый из которых нанесены два электрода, позволяющие измерить удельное сопротивление ферритов; при этом площадь электродов $S_R = 30 \text{ мм}^2$, а расстояние между ними $h_R = 2 \text{ мм}$. К выводам от этих электродов подключается внешний омметр.

6.3. Проведение испытаний

6.3.1. Исследование полевой зависимости

Соединить выход низкочастотного генератора с гнездом G лабораторного пульта, а милливольтметр подключить к гнезду PU . Включить приборы в сеть и дать прогреться.

Установить переключатель $S1$ в положение 1, соответствующее испытанию катушки на феррите 2000НМ (табл. 6.1). Установить частоту сигнала 10 кГц. Переключатель $S2$ поставить в положение U_R . Регулируя величину выходного напряжения генератора, установить одно из требуемых значений U_R (см. ниже), контролируя его милливольтметром. Переключив $S2$ в положение U_{BX} , измерить и записать в табл. 6.2 величину сигнала на входе измерительной схемы. Аналогичным образом провести измерения для катушки с ферритом 20000НМ (положение 2 переключателя $S1$) на частоте 1 кГц.

Измерения провести при следующих значениях U_R :

для образца 2000НМ – 20, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 800, 1000, 1500, 2000, 3000 мВ;

для образца 20000НМ – 10, 20, 30, 40, 50, 70, 100, 150, 300, 400, 500 мВ.

Таблица 6.2

Токовые зависимости свойств катушек

Марка феррита	U_R , мВ	U_{BX} , мВ	U_L , мВ	I , мА	H_m , А/м	L , мГн	M	B_m , Тл

6.3.2. Исследование частотной зависимости

Измерения провести при следующих значениях частоты:

для образца 20000НМ – 1, 2, 4, 6, 8, 10, 20, 40, 60, 80, 100 кГц;

для образца 2000НМ – 0,1; 0,15; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0 МГц.

Поставить переключатель $S1$ в положение 3, соответствующее испытанию катушки на феррите 2000НМ (табл. 6.1). Подключить к лабораторному пульту генератор, соответствующий указанному для данного образца диапа-

зону частот. На каждой частоте установить $U_R = 15$ мВ и измерить $U_{вх}$. Результаты записать в табл. 6.3.

Таблица 6.3

Частотные зависимости свойств катушек

Марка феррита	f , кГц	$U_{вх}$, мВ	U_L , мВ	L , мГн	μ

В положении 2 переключателя $S1$ провести аналогичные измерения для катушки с ферритом 20000НМ.

6.3.3. Определение удельного сопротивления

Для определения удельного сопротивления подключить омметр земляным концом к клемме \perp на измерительном стенде, а потенциальным – поочередно к клеммам, соответствующим ферритам разных марок.

Измерить R – сопротивление ферритовых сердечников.

6.4. Обработка результатов

6.4.1. По данным п. 6.3.1, пользуясь выражением (6.4), определить индуктивность катушек при различных токах в обмотке: $L = U_L / (2\pi f I)$. Результаты занести в табл. 6.2. Построить зависимость $L(I)$ для обеих катушек.

6.4.2. По данным того же пункта построить кривые намагничивания $B_m(H_m)$ и зависимости магнитной проницаемости от напряженности поля $\mu(H_m)$ для исследованных образцов ферритов.

Амплитудное значение напряженности магнитного поля в кольцевом сердечнике катушки индуктивности можно найти из выражения:

$$H_m = 2^{1.5} I w / \pi(D + d).$$

Магнитная проницаемость кольцевого сердечника в соответствии с выражением (6.1) равна

$$\mu = L \pi(D + d) / \mu_0 w^2 h(D - d).$$

Амплитудное значение магнитной индукции в сердечнике определить как $B_m = \mu_0 \mu H_m$. Результаты занести в табл. 6.2.

6.4.3. По данным п. 6.3.2, пользуясь формулами (6.2) и (6.1), вычислить значения индуктивности катушек и магнитной проницаемости ферритов при разных частотах и занести их в табл. 6.3.

6.4.4. По данным п. 6.3.3 определить удельное сопротивление ферритов как $\rho = RS_R / h_R$.

6.4.5. Построить частотные зависимости индуктивности и магнитной проницаемости $\mu(\lg f)$ для исследованных образцов. Отметить значения $f_{кр}$.

6.5. Контрольные вопросы и задачи

1. Что представляет собой феррит? Объясните ход кривой намагничивания и полевой зависимости магнитной проницаемости ферритов.
2. Катушка с ферритовым тороидальным сердечником диаметром 10 мм имеет индуктивность 0,12 Гн и содержит 1000 витков. Определить ток в катушке, при котором магнитная индукция в сердечнике равна 0,1 Тл.
3. Почему в магнитных сердечниках высокочастотных катушек индуктивности нельзя применять металлические ферромагнетики?
4. Есть ли связь между частотной стабильностью и габаритами катушек с одинаковой индуктивностью, изготовленных с использованием различных ферритов?

7. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

7.1. Основные понятия и определения

Стационарная электронная аппаратура питается от стандартной цепи переменного тока (например, от сети 220 В 50 Гц). В то же время для функционирования различных активных элементов аппаратуры (транзисторов, интегральных микросхем, визуальных индикаторов и др.) требуются постоянные напряжения различной величины (от единиц вольт до нескольких киловольт). Преобразование переменного напряжения стандартной сети в требуемое постоянное напряжение осуществляется в блоке питания аппаратуры.

В общем случае блок питания состоит из силового трансформатора, выпрямителя и фильтра. Трансформатор – это элемент, имеющий две индуктивно связанные обмотки: первичную, включенную в сеть, с числом витков w_1 , и вторичную, с числом витков w_2 . Основной характеристикой трансформатора является коэффициент трансформации n :

$$n = U_2 / U_1 = w_2 / w_1,$$

где U_1 и U_2 – действующие значения напряжения в первичной и вторичной обмотках.

Выпрямитель – это устройство, преобразующее переменное напряжение в постоянное. В состав выпрямителя входит один или несколько вентиля (полупроводниковых диодов). Вентиль (его обозначение на схемах по-

казано на рис. 7.1) способен пропускать ток только при одной полярности (в обозначении вентиля направление тока указывает электрод в форме треугольника – его называют анодом). Ток через вентиль протекает только при приложении положительного потенциала к аноду. Выпрямители подразделяются на однополупериодные и двухполупериодные.

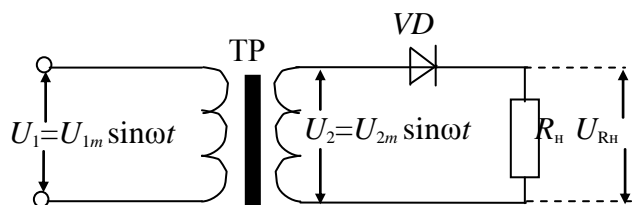


Рис. 7.1. Схема однополупериодного выпрямителя

Однополупериодный выпрямитель (рис. 7.1) содержит один вентиль VD , включенный во вторичную обмотку трансформатора последовательно с сопротивлением нагрузки R_n .

При подключении первичной обмотки трансформатора к сети синусоидального напряжения с действующим значением U_1 , во вторичной обмотке индуцируется напряжение $U_2 = U_{2m} \sin \omega t$. В те моменты времени, когда на выходе трансформатора возникает положительная полуволна напряжения, вентиль открыт и через него, а также и через сопротивление нагрузки R_n протекает ток i_{R_n} , (рис.7.2).

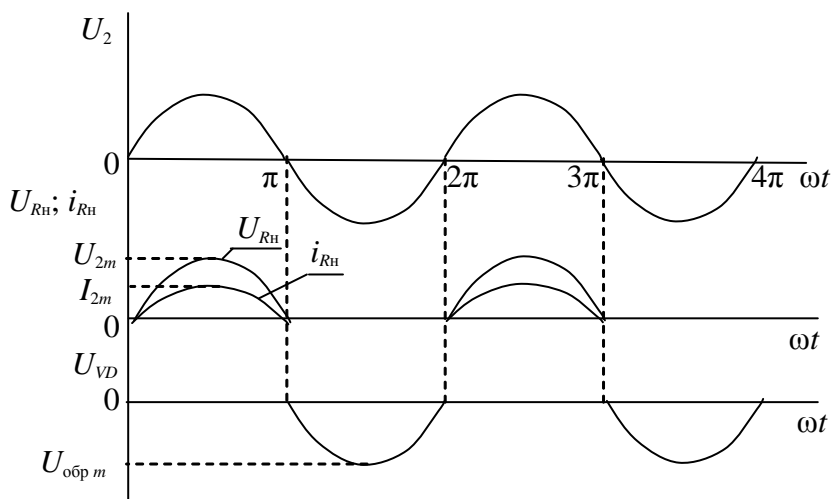


Рис. 7.2. Временные диаграммы токов и напряжений в однополупериодной схеме выпрямления

При изменении полярности вторичного напряжения к аноду вентиля прикладывается отрицательное напряжение и он закрыт. Таким образом, за каждый период, через нагрузочный резистор протекает ток только в одном направлении (выпрямленный ток) в течение одного полупериода.

Представление выпрямленного напряжения $U_{RH}(t)$ в виде ряда Фурье позволяет определить важнейшие параметры выпрямителя:

$$U_{RH}(t) = \frac{U_{2m}}{\pi} + \frac{U_{2m}}{2} \sin \omega t - \frac{2U_{2m}}{3\pi} \cos 2\omega t - \frac{2U_{2m}}{15\pi} \cos 4\omega t - \dots$$

Первый член этих рядов определяет величину среднего значения (постоянную составляющую) выпрямленного напряжения и обусловленного им тока: $U_0 = U_{2m} / \pi$; $I_0 = I_{RH \max} / \pi$.

Коэффициент пульсации выпрямленного напряжения k_π равен отношению амплитуды низшей гармоники (в данном случае первой) к значению постоянной составляющей U_0 : $k_\pi = \pi/2 = 1,57$. Максимальное значение обратного напряжения $U_{обр\ m}$, которое приложено в вентиле в запертом состоянии, равно амплитуде вторичного напряжения: $U_{обр\ m} = U_{2m}$.

Двухполупериодный выпрямитель со средней точкой содержит трансформатор, имеющий вывод средней точки вторичной обмотки и два вентиля. Нагрузочный резистор R_H подключается между общей точкой диодов и средней точкой вторичной обмотки трансформатора, (рис. 7.3). Напряжения на противоположных концах вторичной обмотки, измеряемые относительно средней точки, находятся в данной схеме в противофазе, т.е. когда например, на верхнем выводе положительная полуволна напряжения, то на нижнем отрицательная или наоборот. В результате, когда открыт вентиль $VD1$, вентиль $VD2$ закрыт, а когда вентиль $VD1$ закрыт, вентиль $VD2$ открыт. Таким образом, через нагрузку ток протекает в течение обоих полупериодов подводимого напряжения и поэтому такой выпрямитель называется двухполупериодным.

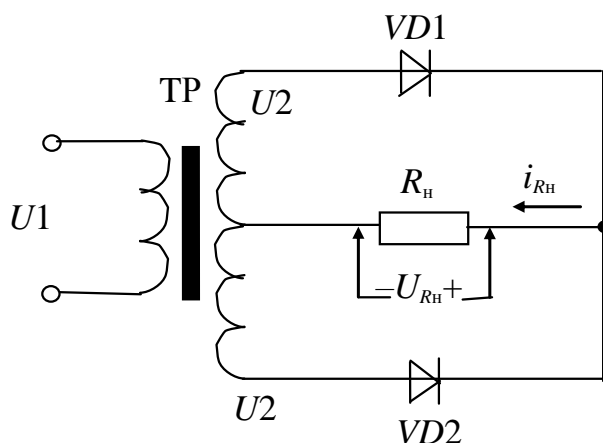


Рис. 7.3. Схема двухполупериодного выпрямителя со средней точкой

Работа двухполупериодного выпрямителя со средней точкой иллюстрируется рис. 7.4.

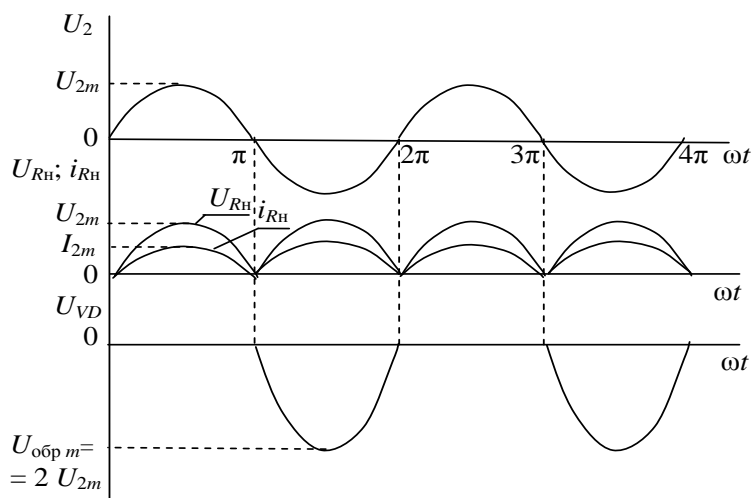


Рис. 7.4. Временные диаграммы токов и напряжений в двухполупериодной схеме выпрямления со средней точкой

Ряд Фурье для выпрямленного напряжения $U_{RH}(t)$ имеет следующий вид:

$$U_{RH}(t) = \frac{2U_{2m}}{\pi} - \frac{4U_{2m}}{3\pi} \cos 2\omega t - \frac{4U_{2m}}{15\pi} \cos 4\omega t - \frac{4U_{2m}}{35\pi} \cos 6\omega t - \dots$$

Здесь U_{2m} – максимальное (амплитудное) значение напряжения вторичной обмотки, измеряемое между одним из концов вторичной обмотки и ее средней точкой; $I_{2m} = I_{RH \max} = U_{2m} / R_H$ – максимальное значение тока нагрузки. Как видно из рис. 7.3, среднее значение выпрямленного напряжения здесь в 2 раза больше, чем в однополупериодной схеме, а коэффициент пульсации равен: $k_{\pi} = 2/3 = 0,66$. По сравнению с однополупериодным выпрямителем данный выпрямитель позволяет в 2 раза увеличить мощность, отдаваемую в нагрузку, без увеличения габаритов и мощности трансформатора.

Двухполупериодный режим работы выпрямителя можно реализовать с трансформатором без средней точки вторичной обмотки в так называемой мостовой схеме (рис. 7.5).

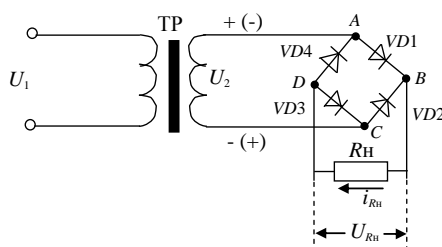


Рис. 7.5. Однофазная мостовая схема выпрямления

Схема состоит из трансформатора и четырех вентилях, образующих выпрямительный мост. Одна диагональ моста подключается к вторичной обмотке трансформатора, а ко второй диагонали, с которой снимается выпрямленное напряжение, подключается нагрузка R_n . При положительной полярности на вторичной обмотке трансформатора вентили $VD1$ и $VD3$ открыты и через них протекает ток через R_n . В это же время вентили $VD2$ и $VD4$ закрыты. Когда напряжение на вторичной обмотке меняет свою полярность, вентили $VD1$ и $VD3$ закрываются, а вентили $VD2$ и $VD4$ открываются и через R_n протекает ток того же направления (рис. 7.6). Данная схема выпрямления имеет более простой, а значит, более дешевый трансформатор, а обратное напряжение, прикладываемое к вентилю, в 2 раза ниже, чем в схеме двухполупериодного выпрямления со средней точкой. В рассмотренных схемах выпрямителей коэффициент пульсации выпрямленного напряжения имеет значительную величину. Для уменьшения коэффициента пульсации применяют различные фильтры.

Для оценки эффективности действия фильтра вводится коэффициент сглаживания $k_{сгл} = \frac{k_n}{k'_n}$, где $k_n = U_1/U_0$ – коэффициент пульсации выходного напряжения выпрямителя без фильтра (U_1 – амплитуда низшей гармоники в спектре выходного напряжения без фильтра, U_0 – среднее значение выпрямленного напряжения без фильтра); $k'_n = U'_1/U'_0$ коэффициент пульсации на выходе фильтра (U'_1 – амплитуда низшей гармоники на выходе фильтра, U'_0 – среднее значение выпрямленного напряжения на выходе фильтра).

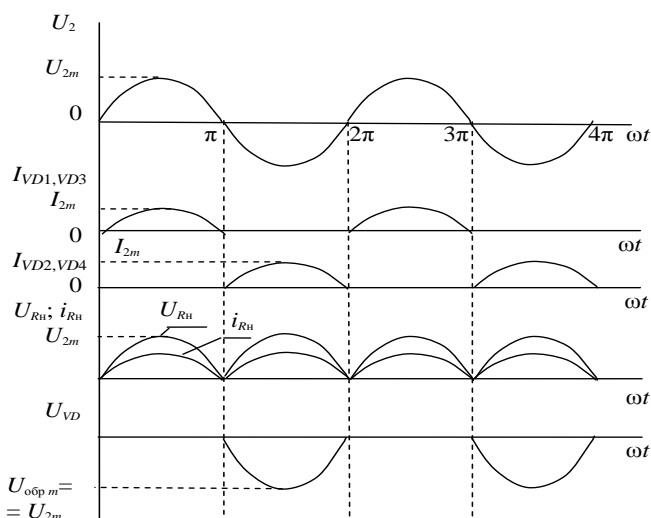


Рис. 7.6. Временная диаграмма токов и напряжений в мостовой схеме выпрямления

Тогда $k_{\text{сгл}} = \frac{U'_0}{U_0} \cdot \frac{U_1}{U'_1} = \lambda \cdot k_\phi$, где $\lambda = U'_0/U_0$ - коэффициент передачи постоянной составляющей; $k_\phi = U_1/U'_1$ - коэффициент фильтрации. Обычно $\lambda = 0,95 \dots 0,99$, поэтому $k_{\text{сгл}} \approx k_\phi$.

При использовании индуктивного фильтра индуктивность включается последовательно с нагрузкой. Для расчета фильтрующего действия выпрямитель заменяется двумя последовательно включенными источниками (рис. 7.7).

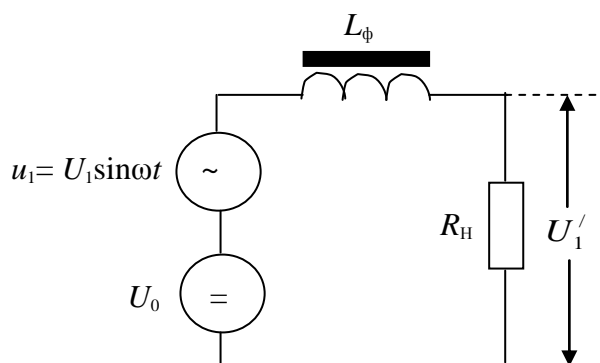


Рис. 7.7. Эквивалентная схема выпрямителя с индуктивным фильтром

Один из источников – источник постоянного напряжения U_0 с напряжением, равным значению постоянной составляющей выпрямленного напряжения. Другой источник создает переменное напряжение $u_1 = U_1 \sin \omega t$, амплитуда которого U_1 равна амплитуде низшей гармоники пульсаций выпрямленного напряжения.

Амплитуда первой гармоники на нагрузочном резисторе будет тогда авна:

$$U'_1 = \frac{U_1}{\sqrt{R_H^2 + (\omega L_\phi)^2}} \cdot R_H.$$

Отсюда, выражение для коэффициента сглаживания будет следующим:

$$k_{\text{сгл}} \cong k_\phi = \frac{U_1}{U'_1} = \frac{\sqrt{R_H^2 + (\omega L_\phi)^2}}{R_H}.$$

Если задан коэффициент сглаживания, то можно определить необходимое значение индуктивности фильтра: $L_\phi = \frac{R_H}{\omega} \sqrt{k_{\text{сгл}}^2 - 1}$.

Здесь ω – угловая частота низшей гармоники на выходе выпрямителя ($\omega = 2\pi f$). Заметим, что пульсации выходного напряжения однофазного однополупериодного выпрямителя имеют частоту низшей гармоники f , совпа-

дающую с частотой питающей сети $f = 50$ Гц, а при двухполупериодном выпрямлении эта частота составляет $2f$, т.е. 100 Гц.

Емкостной фильтр состоит из конденсатора C , подключаемого параллельно сопротивлению нагрузки R_n (рис. 7.8). В установившемся режиме, когда напряжение на конденсаторе U_C меньше напряжения на выходе вторичной обмотки трансформатора, происходит заряд конденсатора, а когда оно больше, конденсатор отдает свой заряд в нагрузку. В результате напряжение на нагрузке R_n сглаживается (рис. 7.9).

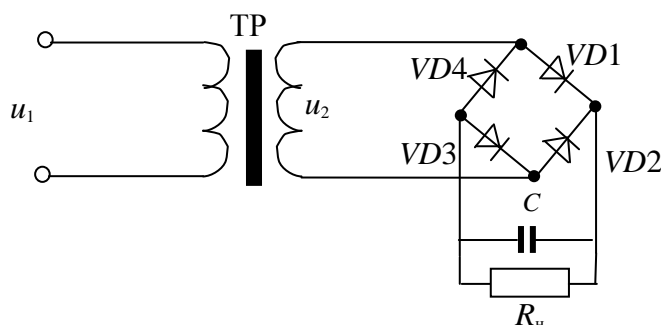


Рис. 7.8. Схема выпрямителя с емкостным фильтром

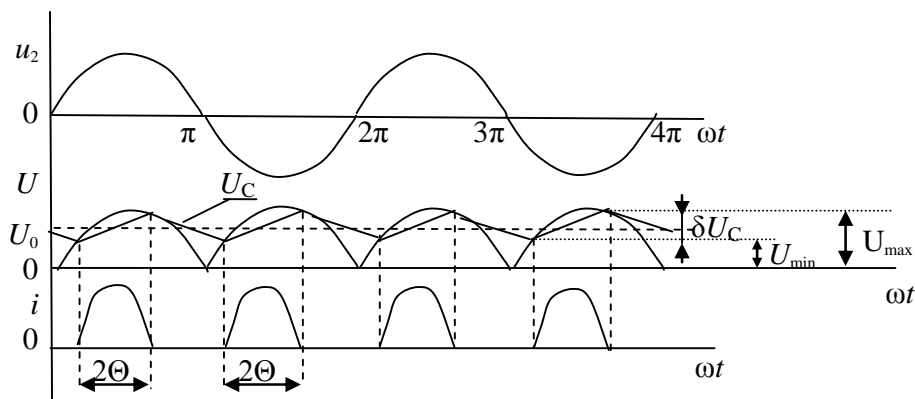


Рис. 7.9. Временные диаграммы емкостного фильтра

Как видно из временной диаграммы, при наличии емкостного фильтра ток через вентили протекает не весь полупериод, а только некоторую его часть 2Θ . В двухполупериодной схеме выпрямления заряд и разряд конденсатора происходят дважды за продолжительность периода питающей сети.

Обычно емкость конденсатора фильтра C выбирается такой, чтобы $x_C = 1/\omega C \ll R_n$, тогда ток разрядки конденсатора практически равен среднему выпрямленному току $I_0 \approx I_{cp} = U_0/R_n$, т.е. $U_0 = I_0 R_n$. Коэффициент пульсаций и коэффициент сглаживания при этих допущениях будут равны

$$k'_n = \frac{U_m}{U_0} = \frac{1}{4CfR_n}; \quad k_{cгл} = \frac{k_n}{k'_n} = 0,66 \cdot 4 CfR_n = 2,64 \cdot CfR_n.$$

Если задан коэффициент пульсаций, то емкость конденсатора фильтра определяется соотношением $C = \frac{1}{4fR_H k_n}$.

Индуктивно-емкостной фильтр состоит из индуктивности L_Φ , включаемой последовательно с нагрузкой R_H и конденсатора C , включенного параллельно R_H . В эквивалентной схеме выпрямитель заменяется двумя последовательно включенными источниками: источником постоянного напряжения U_0 и источником переменного напряжения u_1 (рис. 7.10). Комплексное сопротивление индуктивности равно $Z_1 = X_L = j\omega L$. Комплексное сопротивление параллельного включения C и R_H равно:

$$Z_2 = \left(\frac{1}{R_H} + j\omega C \right)^{-1} = \frac{R_H}{1 + j\omega C R_H}.$$

Следовательно, переменное напряжение u^* , создаваемое входным напряжением u_1 и снимаемое с параллельного включения R_H и C , может быть рассчитано по формуле делителя напряжения: $u^* = u_1 \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}$. Отсюда, коэффициент сглаживания фильтра равен:

$$k_{сгл} \cong k_\Phi = \left| \frac{u_1}{u^*} \right| = \left| \frac{Z_1 + Z_2}{Z_2} \right| = \left| 1 + \frac{Z_1}{Z_2} \right|.$$

Обычно $\omega C R_H \gg 1$. Тогда выражение для коэффициента сглаживания примет вид: $k_{сгл} = |1 - \omega^2 LC| = \omega^2 LC - 1$.

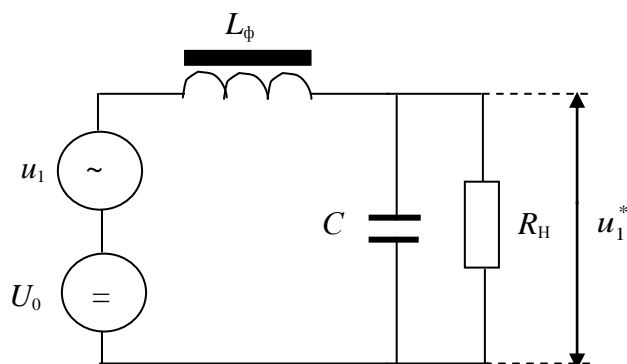


Рис. 7.10. Эквивалентная схема индуктивно-емкостного фильтра

Если заданы коэффициент сглаживания и сопротивление нагрузки, то элементы фильтра рассчитываются исходя из следующих соотношений:

$$LC = \frac{k_{сгл} + 1}{\omega^2}; \quad C \gg \frac{1}{\omega R_H}.$$

П-образный LC фильтр представляет собой схему, состоящую из двух конденсаторов и индуктивности (рис. 7.11).

Такой фильтр можно представить как двухзвенный, состоящий из емкостного фильтра с конденсатором C_1 и индуктивно-емкостного LC_2 . Коэффициент сглаживания П-образного фильтра равен произведению коэффициентов сглаживания составляющих его звеньев: $k_{сгл} = k_{сгл1} \cdot k_{сгл2}$, где $k_{сгл1}$ – коэффициент сглаживания емкостного фильтра; $k_{сгл2}$ – коэффициент сглаживания индуктивно-емкостного фильтра.

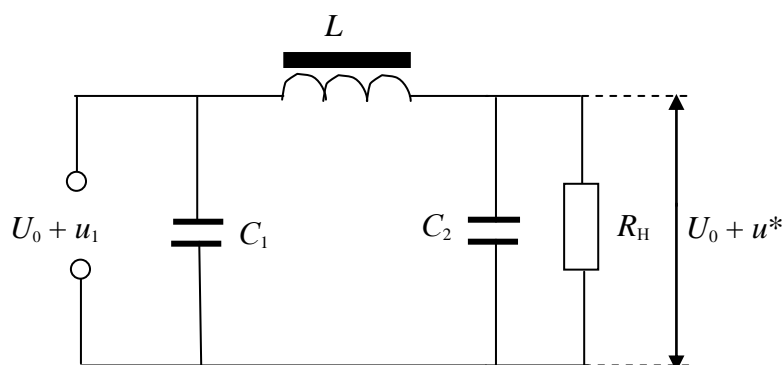


Рис. 7.11. Схема П-образного индуктивно-емкостного фильтра

7.2. Описание установки

На передней панели лабораторного макета находятся 4 переключателя $S1$, $S2$, $S3$, $S4$, посредством которых обеспечивается коммутация между компонентами измерительного стенда в соответствии с электрической схемой, приведенной на рис. 7.12.

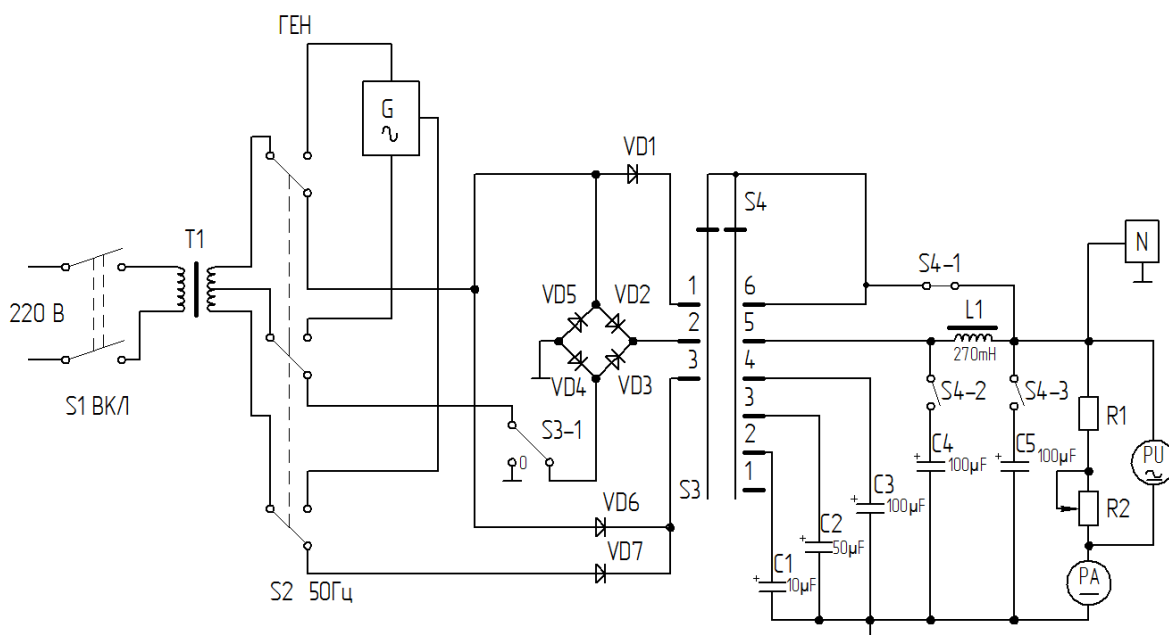


Рис. 7.12. Схема установки

Переменное напряжение частотой 50 Гц, снимаемое со вторичной обмотки понижающего трансформатора Т1, может быть подано на одну из схем выпрямительных преобразователей. В работе исследуются свойства трех типов выпрямителей: однополупериодного выпрямителя на основе диода $VD1$; двухполупериодного мостового типа, собранного на диодах $VD2$ - $VD5$; двухполупериодного типа (со средней точкой на трансформаторе) на диодах $VD6$ - $VD7$.

Для исследования свойств перечисленных выпрямителей на повышенной частоте (500 Гц) используется генератор высокой частоты G , подсоединяемый к схемам переключателем $S2$. Выходное выпрямленное напряжение через многопозиционный переключатель $S3$ может быть подано в нагрузку или непосредственно, либо с применением сглаживающих фильтров. Состояние контактной пары $S3-1$, показанное на рис. 7.12 соответствует включению мостовой схемы выпрямителя. В качестве нагрузки используется последовательно включенные ограничительный резистор $R1$ и регулируемый резистор $R2$. Для измерения тока и напряжения нагрузки служат амперметр PA и вольтметр PU . Пульсация выпрямленного напряжения в исследуемых типах преобразователей фиксируется на экране осциллографа N . В работе для выяснения эффекта сглаживания применяются как емкостные фильтры с конденсаторами различного номинала, подсоединяемые параллельно нагрузке, так и комбинированные индуктивно-емкостные Г-образные и П-образные фильтры. Подсоединение фильтров обеспечивается многопозиционным переключателем $S4$, имеющим 6 позиционных положений. В положении 1 выпрямленное напряжение поступает без фильтрации непосредственно в нагрузку. Положениям 2, 3, 4 соответствует параллельное подключение к нагрузке оксидных конденсаторов $C1$, $C2$, $C3$. В положении 5 происходит подключение Г-образного $L1$ - $C5$ фильтра. При этом контактная пара $S4-1$ переходит в открытое (разомкнутое) состояние, подключая катушку $L1$ последовательно нагрузке. Контактная пара $S4-3$ замыкается и подсоединяет конденсатор $C5$ параллельно резисторам $R1$, $R2$. В положении 6 переключателя $S4$ контактная группа $S4-2$ переходит в замкнутое состояние, что обеспечивает подсоединение П-образного $C4$ - $L1$ - $C5$ фильтра.

7.3. Проведение испытаний

7.3.1. Подготовка установки

Включить питание всех приборов и тумблер $S1$ (рис. 7.12), переключатель $S2$ поставить в положение "50 Гц". Универсальный цифровой вольтметр

PU типа GDM-8145 подготовить для измерения напряжения сложной формы: левая клавиша TRUE RMS должна быть отжата, при нажатой правой клавише производить измерение переменной составляющей напряжения, при отпущенной клавише – измерять постоянную составляющую напряжения. Прибор *РА* – установить в режим измерения постоянного тока.

Переключатели *S3* и *S4* должны находиться в положении 1. На осциллографе установить режим измерения напряжения частотой 50 Гц.

7.3.2. Исследование выпрямителей

В положении 1 переключателя *S3* зарисовать осциллограмму напряжения при однополупериодном выпрямлении при максимальном сопротивлении *R2*. Произвести измерение постоянной и переменной составляющих напряжения на нагрузке, определить постоянный ток в нагрузке.

Аналогичные исследования провести для двухполупериодного выпрямителя с мостовой схемой (положение 2 переключателя *S3*) и на трансформаторе со средней точкой (положение 3 переключателя *S3*).

Результаты измерений записать в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Параметры выпрямителей

Тип выпрямителя	I_n , мА	U_0 , В	U , В	U_m , В	k_n
Однополупериодный					
Двухполупериодный с мостовой схемой					
Двухполупериодный на трансформаторе со средней точкой					

7.3.3. Исследование выпрямителей с емкостным фильтром

Поставить переключатель *S3* в положение 1, переключатель *S4* – в положение 2. При этом параллельно нагрузке включается емкость $C1 = 10$ мкФ. Зарисовать осциллограмму напряжения на нагрузке, измерить постоянную и переменную составляющие этого напряжения, измерить ток в нагрузке.

Повторить измерения в положении 3 и 4 переключателя *S4* (емкости $C2 = 50$ мкФ и $C3 = 100$ мкФ).

Аналогичные измерения провести для двухполупериодного выпрямителя с мостовой схемой (положение 2 переключателя $S3$). Результаты измерений записать в табл. 7.2.

Таблица 7.2

Параметры выпрямителей с емкостными фильтрами

Тип выпрямителя	C_{ϕ} , мкФ	I_n , мА	U_0 , В	U_0' , В	U_1 , В	U_1' , В	$k_{сгл} \approx k_{\phi}$
Однополупериодный							
Двухполупериодный с мостовой схемой							

Переключатель $S2$ поставить в положение "ГЕН". На выходе генератора установить напряжение 5-10 В частотой 500 Гц. Провести измерения по п. 7.3.2 и 7.3.3.

7.3.4. Исследование выпрямителей с LC-фильтрами

Для однополупериодного выпрямителя (положение 1 переключателя $S3$) включить Г-образный LC-фильтр (переключатель $S4$ – в положении 5). Измерить постоянную и переменную составляющие напряжения на нагрузке. Повторить измерение для двухполупериодного выпрямителя (положение 2 переключателя $S3$).

Аналогичные измерения провести для однополупериодного и двухполупериодного выпрямителей с П-образным LC-фильтром (положение 6 переключателя $S4$). Результаты измерений записать в табл. 7.3.

Таблица 7.3

Параметры выпрямителей с LC-фильтрами

Тип выпрямителя	I_n , мА	U_0 , В	U_0' , В	U_1 , В	U_1' , В	$k_{сгл}$	λ	k_{ϕ}
Однополупериодный с Г-образным LC-фильтром								
Двухполупериодный с Г-образным LC-фильтром								
Однополупериодный с П-образным LC-фильтром								
Двухполупериодный с П-образным LC-фильтром								

7.4. Обработка результатов

7.4.1. По данным табл. 7.1 рассчитать коэффициент пульсации для каждой из трех исследованных схем выпрямителей. Сравнить полученные результаты с теоретическими значениями.

7.4.2. По данным табл. 7.2, пользуясь выражениями (7.8) и (7.9), определить коэффициент сглаживания $k_{\text{сгл}}$ и коэффициент фильтрации $k_{\text{ф}}$ для однополупериодного и двухполупериодного выпрямителей с емкостным фильтром. Расчет провести для $C_{\text{ф}} = 10$ мкФ; 50 мкФ и 100 мкФ.

7.4.3. По данным табл. 7.3 определить $k_{\text{сгл}}$ для выпрямителей с LC-фильтрами Г- и П-образного типа. Оценить различные $k_{\text{сгл}}$ и $k_{\text{ф}}$ за счет использования катушки индуктивности $L_{\text{ф}}$ с конечным значением сопротивления обмотки.

7.4.4. На всех осциллограммах напряжений проставить масштаб.

Отчет должен содержать схемы исследованных выпрямителей с фильтрами, осциллограммы напряжений, заполненные табл. 7.1, 7.2, 7.3.

7.5. Контрольные вопросы

1. Сравните между собой три исследованные схемы выпрямителей. Укажите их преимущества и недостатки.
2. Почему возникает необходимость в совместном использовании выпрямителей и фильтров?
3. Сравните между собой исследованные фильтры по экономическим, техническим и эксплуатационным параметрам.
4. Какие типы конденсаторов наиболее пригодны для использования в фильтрах? Какими свойствами они должны обладать?
5. Какие основные требования предъявляются к фильтровым катушкам индуктивности? Почему, как правило, они имеют магнитные сердечники?

Список литературы

1. Сорокин В.С., Антипов Б.Л., Лазарева Н.П. Материалы и элементы электронной техники: В 2 т. Т. 2: Активные диэлектрики, магнитные материалы, элементы электронной техники: Учебник для вузов.- М.: "Академия", 2006.
2. Антипов Б.Л., Сорокин В.С., Терехов В.А. Материалы электронной техники. Задачи и вопросы. Учеб. пособие.- СПб: "Лань", 2001.
3. Быстров Ю.А., Мироненко И.Г. Электронные цепи и микросхемотехника: Учебник.- М.: Высш. шк., 2002.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Международная система обозначений номинальных сопротивлений резисторов и номинальных емкостей конденсаторов

Таблица П.1

Ряды номинальных сопротивлений резисторов и номинальных емкостей конденсаторов

Допускаемое отклонение от номинального значения, %	Числовые коэффициенты, умножаемые на любое число, кратное 10	Ряд
±5	10 11 12 13 15 16 18 20 22 24 27 30 33 36 39 43 47 51 56 62 68 75 82 91	E24
±10	10 12 15 18 22 27 33 39 47 56 68 82	E12
±20	10 15 22 33 47 68	E6
±30	10 22 47	E3

Таблица П.2

Обозначения допусков резисторов и конденсаторов

Допуск, %		±0,1	±0,2	±0,5	±1	±2	±5	±10	±20	±30
Буквенный индекс	Латин.	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>F</i>	<i>G</i>	<i>J</i>	<i>K</i>	<i>M</i>	<i>N</i>
	Русск.	Ж	У	Д	Р	Л	И	С	В	Ф
Ряд номиналов		E192			E96	E48	E24	E12	E6	E3

Содержание

1. Определение эксплуатационных характеристик пассивных элементов электронной техники	3
2. Исследование линейных постоянных резисторов.....	15
3. Исследование переменных резисторов и конденсаторов.....	20
4. Исследование нелинейных полупроводниковых резисторов	26
5. Исследование элементов гибридных интегральных микросхем	33
6. Исследование катушек индуктивности на ферритовых сердечниках.....	37
7. Исследование элементов преобразовательных устройств	42
Список литературы	54
Приложение	55

Редактор

ЛР №

Подписано в печать	Формат 60x84 1/16
Бумага тип. № 2. Печать офсетная. Усл. печ. л. 3,5	Уч. – изд. л. 4
Гарнитура «Таймс». Тираж	экз. Заказ №

Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
197376, С.-Петербург, ул. Проф. Попова, 5