

КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. А.Н.
ТУПОЛЕВА

Кафедра теоретической радиотехники и электроники

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ГИБРИДНЫХ
ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Методические указания к лабораторной работе № 209

Казань – 1999

УДК 621.38

Исследование элементов гибридных интегральных микросхем: Методические указания к лабораторной работе №209 / Казанский Государственный технический университет; Сост.: Л.Н. Климова, Н.К. Насыров. Казань, 1993.19с.

Цель работы – экспериментальное изучение частотных характеристик пленочных RC-структур, а также активного фильтра на основе гибридной ИМС.

I. ВВЕДЕНИЕ

Микросхемы, в которых наряду с пленочными пассивными элементами используются дискретные, бескорпусные диоды, транзисторы и интегральные схемы получили название гибридных интегральных схем.

По технологическому принципу изготовления гибридные ИМС подразделяются на тонкопленочные и толстопленочные. При изготовлении толстопленочных микросхем на изолирующую подложку наносят через сетку-трафарет проводящие резистивные и диэлектрические композиции с последующим вжиганием (резисторы, конденсаторы, проводники). Толщина наносимых пленок, образующих элементы микросхемы, составляют от единицы до десятков микрометров. При изготовлении тонкопленочных микросхем пассивные элементы получают путем последовательного нанесения проводящих, резистивных и диэлектрических слоев толщиной порядка десятых и сотых долей микрометра. Необходимая конфигурация элементов в этом случае достигается либо с помощью трафаретов в процессе нанесения пленки, либо путем избирательного химического травления сплошной пленки.

Навесные активные элементы крепят на плате с пленочными пассивными элементами или на основании корпуса микросхемы. Для защиты от внешних воздействий и создания выводов микросхему помещают в корпус.

Основными конструктивными элементами гибридной ИМС являются:

- подложка, на которой размещаются пассивные и активные элементы;
- пленочные резисторы, конденсаторы, проводники, контактные площадки;
- навесные бескорпусные полупроводниковые приборы (или кристалл полупроводниковой ИМС) с гибкими проволочными выводами или жестко фиксированной системой выводов;
- навесные миниатюрные пассивные элементы (конденсаторы с емкостями больших номиналов, трансформаторы, дроссели), которые применяют в исключительных случаях;
- корпус для герметизации микросхемы и закрепления ее выводов.

На рис.1 изображено устройство гибридной ИМС на примере простейшей электрической цепи.

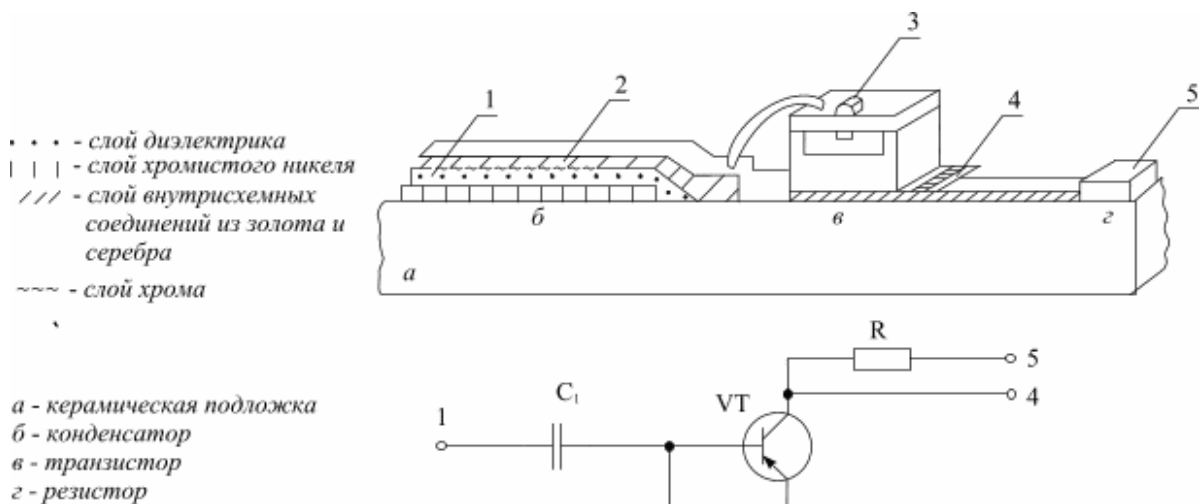


Рис.1

Подложки в пленочных микросхемах играют важную роль. Во-первых, подложка является конструктивной основой пленочной микросхемы и, во-вторых, материал подложки и его обработка оказывают существенное влияние на параметры осаждаемых пленочных слоев и надежность всей микросхемы. В настоящее время все большее применение для подложек пленочных микросхем находят такие материалы, как ситал и фотоситалл.

Пленочные резисторы конструктивно выполняются в виде резистивной пленки 1, которая наносится на подложку в виде полоски (рис.2,а) или змейки (рис.2,б) и двух контактных площадок 2.

Они характеризуются следующими основными параметрами:

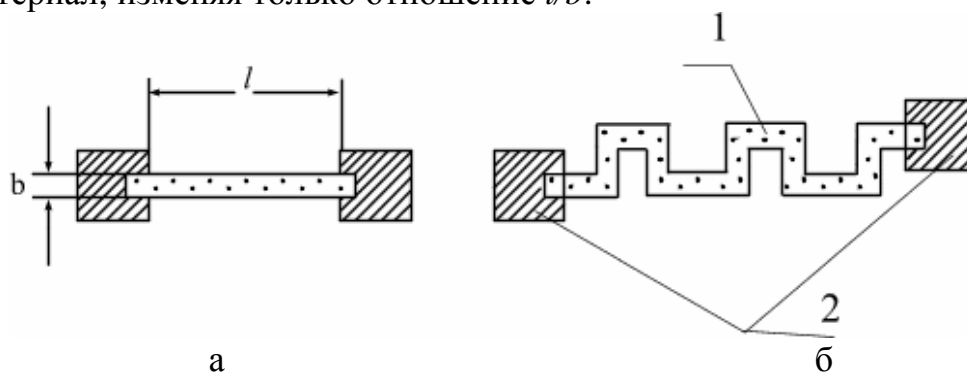
номинальной величиной сопротивления R , относительным допуском на сопротивление $\frac{\pm \Delta R}{R} \%$, максимальной мощностью рассеяния $P_{R \max}$, температурным коэффициентом сопротивления ТКС $1/^\circ\text{C}$, пробивным напряжением $U_{R \text{ пр}}$. Наиболее распространенной является прямоугольная форма пленочных резисторов. Сопротивления пленочного резистора прямоугольной формы определяется выражением

$$R = \rho_0 \frac{l}{S} = \rho \frac{l}{db},$$

где ρ - удельное сопротивление резистивного материала, l - длина пленочного резистора, d и b - толщина и ширина резистивной пленки (рис.2).

Качество резистивных пленок оценивают удельным поверхностным сопротивлением $\rho_{cl} : \rho_{cl} = \frac{\rho}{d}$. Условно ρ_{cl} резистивного материала определяют как удельное поверхностное сопротивление квадратной резистивной пленки, не зависящее от размеров квадрата, и оценивают в Ом / квадрат.

Использование $\rho_{\text{сл}}$ в качестве параметра резистивной пленки удобно и тем, что для получения резисторов с различными сопротивлениями можно наносить один и тот же материал, изменяя только отношение l/b .



l – длина пленки b – ширина пленки

Рис.2

Для формирования тонкопленочных резисторов широко используются хром, нихром, титан, тантал, никель, вольфрам и некоторые сложные соединения, например, двуокись олова. Особенно широко используются резистивные пленки из нихрома и тантала, так как они обладают высокой стабильностью и низким значением температурного коэффициента сопротивления (ТКС). Пленка наносится методом вакуумного испарения при температуре испарения 1600°C . Уход сопротивлений от номинала даже негерметизированных нихромовых резисторов в течение 5000 часов не превышает 1%. Нихромовые пленки обеспечивают диапазон удельных сопротивлений от 50 до 300 Ом / квадрат с допуском на номинал $\pm 5\%$. Максимальное сопротивление нихромовых пленочных резисторов имеет величину порядка 50 КОм. Удельная мощность рассеяния нихромовой пленки составляет примерно 1 Вт/см^2 .

Танталовые резистивные пленки наносят методом катодного распыления тантала в атмосфере инертного газа с последующим анодированием. В результате анодирования на поверхности тантала образуется слой окисла Ta_2O_5 . Окисел служит хорошим изолятором и, кроме того, выполняет защитные функции. Танталовые резисторы обладают достаточно высокой стабильностью, которая оценивается уходом сопротивления от номинала в рабочем диапазоне температур не более, чем на 1%. ТКС составляет примерно 10^{-4}K^{-1} .

Тонкие пленки тантала и титана могут иметь весьма значительное удельное сопротивление $\rho_{\text{сл}}$ в случае введения в них (путем реактивного распыления) азота, кислорода и углерода, в результате чего в осажденной пленке частично образуются нитриды, оксиды и карбиды. На основе таких пленок из нитрида и карбида тантала удастся получить резистивные элементы с удельным сопротивлением $\rho_{\text{сл}}$ до 1кОм/квadrat и значением ТКС $\pm (50-100) 10^{-6}\text{K}^{-2}$, причем значение за 1000 часов работы изменяется не более, чем на 0,1%.

Вольт-амперная характеристика пленочного сопротивления имеет линейный характер, пока электрическая мощность не превышает максимальную мощность рассеяния.

При изготовлении пленочных резисторов для достижения требуемого номинала осуществляют их подгонку. Существуют методы подгонки, основанные на изменении ρ_{cl} или на изменении геометрического размера резистора. К первым относятся химическое травление поверхности резистора с целью уменьшения его толщины и низкотемпературное окисление или отжиг в инертной среде (таким способом можно увеличить или уменьшить ρ_{cl}). Подгонка за счет изменения геометрических размеров предусматривает удаление части резистивного металла механическим способом или путем воздействия лазерным лучом.

Пленочные конденсаторы состоят из двух проводящих пленок 1, разделенных пленкой диэлектрика 2 (рис.3). основные параметры пленочных конденсаторов; полная емкость C , Φ ; удельная емкость C_0 , $\Phi/\text{см}^2$, максимальное напряжение U_{max} , В; температурный коэффициент емкости ТКЕ, $1^0/\text{C}$, добротность Q ; тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta = 1/R\omega C = r\omega C$, где R - сопротивление диэлектрика, r - сопротивление обкладок. Пленки, используемые для изготовления пленочных конденсаторов, имеют в значительной мере те же механические свойства, что и пленки резисторов. Выбор материала диэлектрика обуславливается технологическими особенностями процесса изготовления и часто находится в прямой связи с выбором материала обкладок. В конденсаторах с диэлектриком из окиси тантала обе обкладки часто выполняются из тантала, наносимого методом катодного распыления. В качестве обкладок конденсаторов в ИС часто используют алюминиевые пленки. Диэлектрическим слоем в таких конденсаторах является обычно пленка из окиси алюминия Al_2O_3 , которую выращивают на поверхности нижней обкладки методом анодирования. Конденсаторы с диэлектриком в виде окиси алюминия отличаются достаточно высоким рабочим напряжением (до 20-50В), однако удельная емкость их относительно мала – 500-800 пф/см². Тангенс угла потерь на частоте 1 мГц имеет величину порядка 0,05.

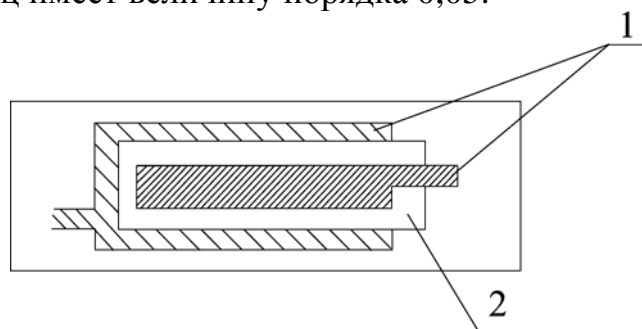


Рис. 3

Пленочные конденсаторы проектируют с таким расчетом, чтобы обеспечить, по крайней мере, двукратный запас по рабочему напряжению.

Индуктивные элементы небольших номиналов для гибридных схем можно получить двумя путями: осаждением на подложку проводящей спирали через соответствующую маску методом вакуумного испарения и изготовлением миниатюрной кольцевой катушки с магнитным сердечником. Однако, не удается пока получить в приемлемых габаритах напыляемые индуктивности более 5 мкГн, а добротность свыше 50.

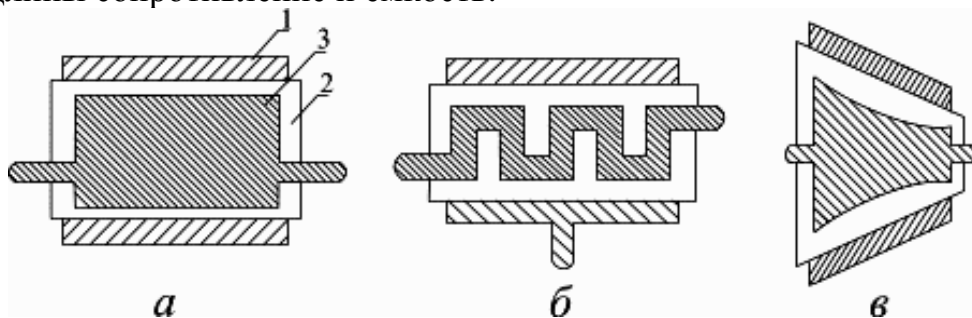
Во многих случаях вместо катушек допускается использование транзисторных схем, эквивалентным индуктивностям, что в основном и находит применение в ИМС.

Пленочные RC-структуры. Пленочные RC-структуры получены в результате интеграции конденсатора и резистора. Конструктивно пленочная структура отличается от пленочного конденсатора тем, что одну из обкладок (обычно верхнюю) выполняют из резистивного материала с большим удельным сопротивлением (рис.4).

Основными параметрами RC-структуры являются полное сопротивление R и полная емкость C , а также параметры, характеризующие свойства пленок резистора, пленочного конденсатора и диэлектрика.

Электрические параметры и характеристики RC-структур зависят от геометрической конфигурации и размеров пленок, их электрофизических параметров, расположения контактов и способа коммутации их между собой. Контур поверхности RC-структуры может иметь различную форму, в том числе прямоугольную (рис.4,а), зигзагообразную (рис.4,б) и экспоненциальную (рис.4,в).

Свойства RC-структур можно описать с помощью линейных дифференциальных уравнений, аналогичных известному телеграфному уравнению, характеризующему распространение сигнала в длинной линии передачи, а саму RC-структуру рассматривать, как пассивную линейную цепь в виде последовательного соединения бесконечно большого числа элементарных ячеек. Эквивалентная схема элементарной ячейки приведена на рис.5, где R_l и C_l - распределенные на единицу длины сопротивление и емкость.



1. Резистивная пленка, нанесенная на подложку
2. Диэлектрическая пленка
3. Резистивная пленка с большим удельным сопротивлением

Рис.4

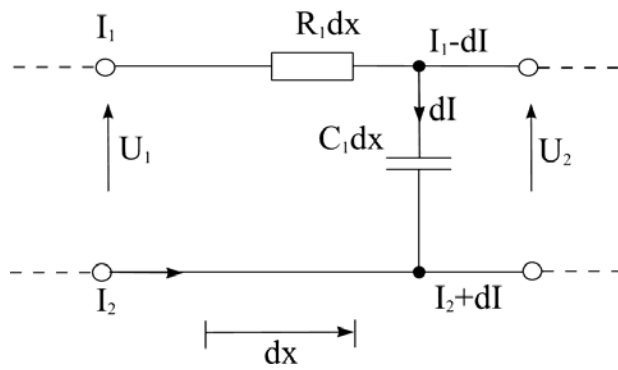


Рис.5

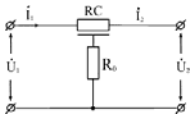
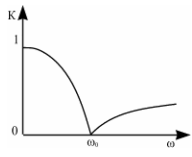
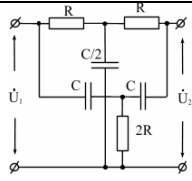
В ряде случаев для приближенных расчетов в ограниченной полосе частот и при заданной точности удобно пользоваться эквивалентными схемами RC-структуры, представляющими собой цепь с сосредоточенными параметрами и

содержащими небольшое число элементарных ячеек.

Наибольшее распространение получили прямоугольные RC-структуры, способы включения и амплитудно - частотные характеристики которых приведены в табл.1. Передаточные характеристики RC-структуры имеют частотно-зависимый характер, поэтому RC- структуры нашли применение при построении пассивных и активных фильтров.

Таблица 1

| № сх ем ы | Схема включения RC - структуры | Коэффициент передачи по на- пряжению $\dot{K} = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1}$ | Амплитудно- частотная характе- ристика RC - структуры | Аналог RC - цепь |
|--------------------|--------------------------------------|---|--|---------------------|
| 1 | | $\dot{K}_1 = \frac{1}{ch\sqrt{j\omega RC}}$ | | |
| 2 | | $\dot{K}_1 = 1 - \frac{1}{ch\sqrt{j\omega RC}}$ | | |
| 3 | | $K_3 = \frac{1}{2}$ | | |

| | | | | |
|----------|---|--|--|---|
| <p>4</p> |  | $\dot{K}_4 = \operatorname{sech} \sqrt{j\omega RC} + \frac{1 - \operatorname{sech} \sqrt{j\omega RC}}{1 - \frac{\alpha}{\sqrt{j\omega RC}} \cdot \operatorname{cth} \sqrt{j\omega RC}}$ $\alpha = \frac{R}{R_0}$ |  |  |
|----------|---|--|--|---|

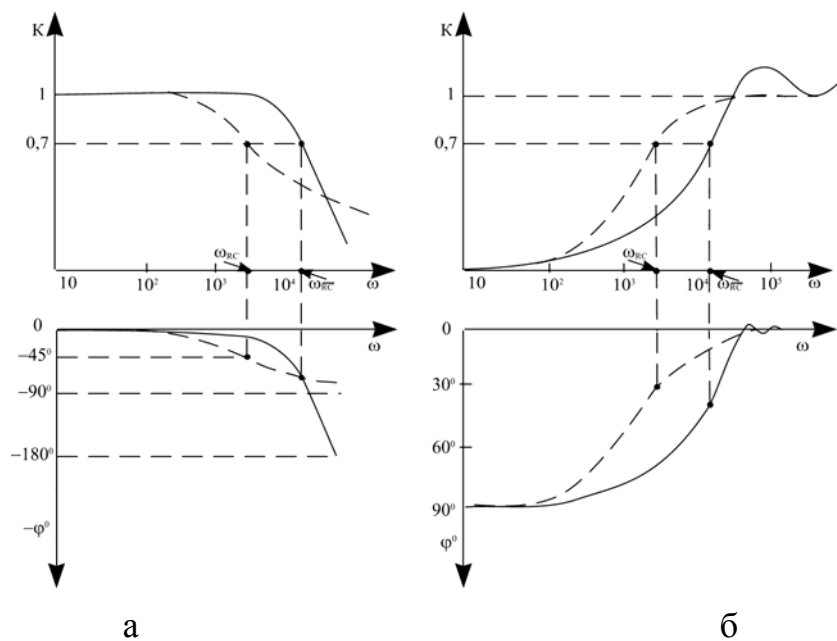


Рис. 6

RC-структура обеспечивает также большой фазовый набег, что делает перспективным ее использование в качестве фазосдвигающей цепи. На границе полосы пропускания сдвиги фаз равны $\overline{\varphi}_{RC} = 56^\circ$ и $\varphi_{RC} = 45^\circ$. Кроме того, избирательные свойства распределенной цепи лучше, чем сосредоточенной.

На рис.6б показаны частотные характеристики RC-структуры для второй схемы включения и там же для сравнения построена соответствующая характеристика RC-цепочки. Включения RC-структуры по этой схеме соответствует фильтру верхних частот (ФВЧ). С увеличением частоты модуль коэффициента передачи сначала монотонно растет до значения 1,13, а затем начинает осциллировать около прямой $K_2 = 1$, постепенно приближаясь к ней.

На граничной частоте ω_{RC} . RC-структура создает большой сдвиг по фазе по сравнению с RC-цепочкой (рис.6,б).

II. ДЛЯ ТРЕТЬЕЙ СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ (ТАБЛ.1) В РЕЖИМЕ ХОЛОСТОГО ХОДА (ПРОВОДИМОСТЬ НАГРУЗКИ $Y_H = 0$) КОЭФФИЦИЕНТ ПЕРЕДАЧИ $K_3 = 0,5$ НЕ ЗАВИСИТ ОТ ЧАСТОТЫ. ЭТУ СХЕМУ РЕКОМЕНДУЮТ

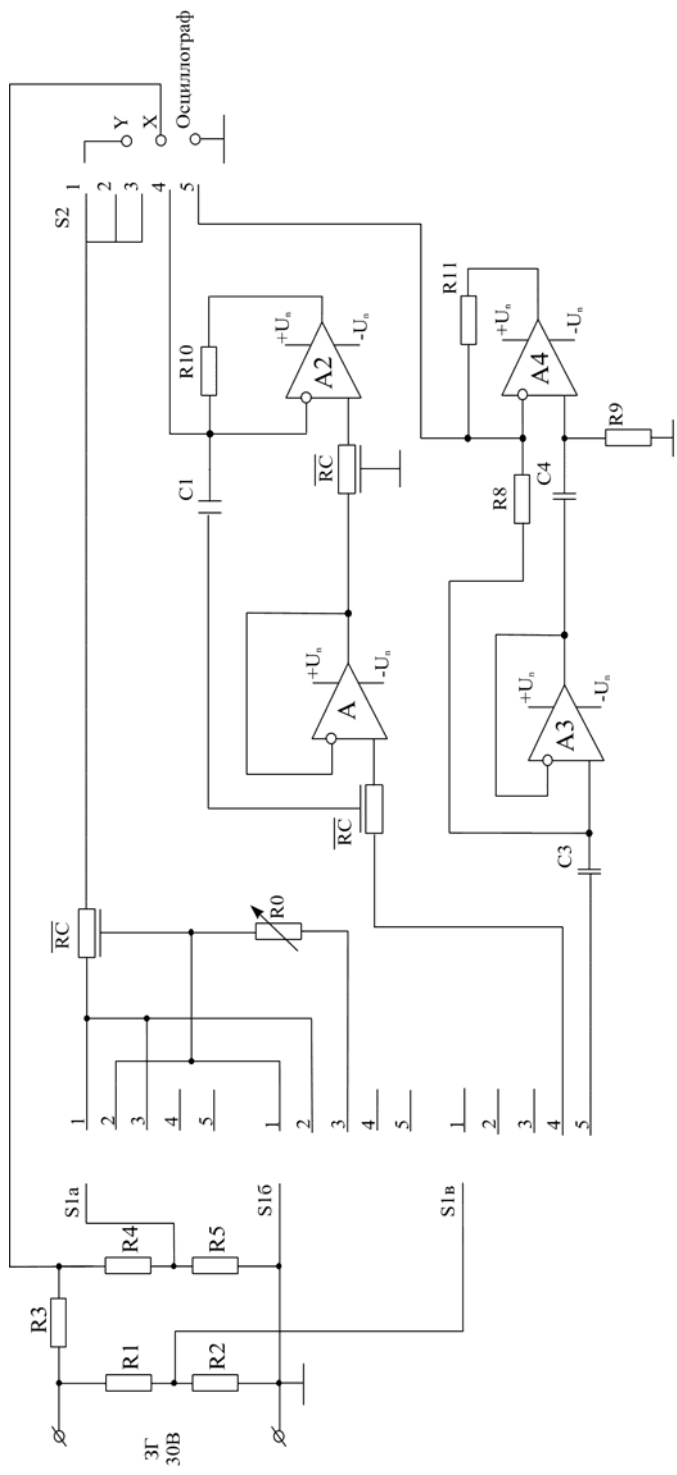


Рис.10

ПРИБОРЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В РАБОТЕ

1. Генератор звуковых частот
2. Ламповый вольтметр
3. Осциллограф
4. Макет

ОПИСАНИЕ МАКЕТА

Принципиальная схема макета дана на рис.10. С помощью макета снимают частотные и фазовые характеристики пленочных RC-структур для трех видов включения: ФНЧ, ФВЧ и режекторный фильтр, а также характеристики активного фильтра (НЧ и ВЧ).

Клеммы “Генератор” предназначены для подключения генератора и параллельно вольтметра для контроля напряжения входного сигнала. Переменное напряжение 3 В с генератора поступает на делитель напряжения с коэффициентом деления 1:300, поэтому на вход фильтров поступает сигнал величиной не более 100 мВ. К выходным клеммам подключается осциллограф. При изменении положения переключателя для исследования могут быть подключены различные фильтры.

С клеммы “Генератор” входное напряжение подается на горизонтальные пластины осциллографа при снятии фазовых характеристик.

Питание активного фильтра осуществляется от источника постоянного напряжения ± 12 В, подключение к источнику производится с помощью штекера.

III. ЗАДАНИЯ

Задание 1. Исследовать фильтр НЧ. Снять и построить частотную характеристику RC- структуры, включенной по схеме фильтра НЧ

$$K_f = f_i(lgf)$$

Определить крутизну затухания характеристики на октаву S дб/окт. Снять и построить фазовую характеристику фильтра.

Задание 2. Исследовать фильтр ВЧ. Снять и построить частотную характеристику RC- структуры, включенной по схеме ВЧ. Определить крутизну затухания характеристики на октаву. Снять и построить фазовую характеристику.

Задание 3. Исследовать режекторный фильтр. Снять и построить частотную характеристику режекторного фильтра. Снять и построить фазовую характеристику. Подсчитать τ_{RC} .

Задание 4. Исследовать активный фильтр. Снять и построить частотную характеристику активного фильтра НЧ второго порядка. Определить крутизну затухания характеристики на октаву.

Задание 5. Исследовать активный фильтр ВЧ второго порядка. Определить S дб/окт.

IV. МЕТОДИКА СНЯТИЯ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Собрать блок-схему (рис. 11)

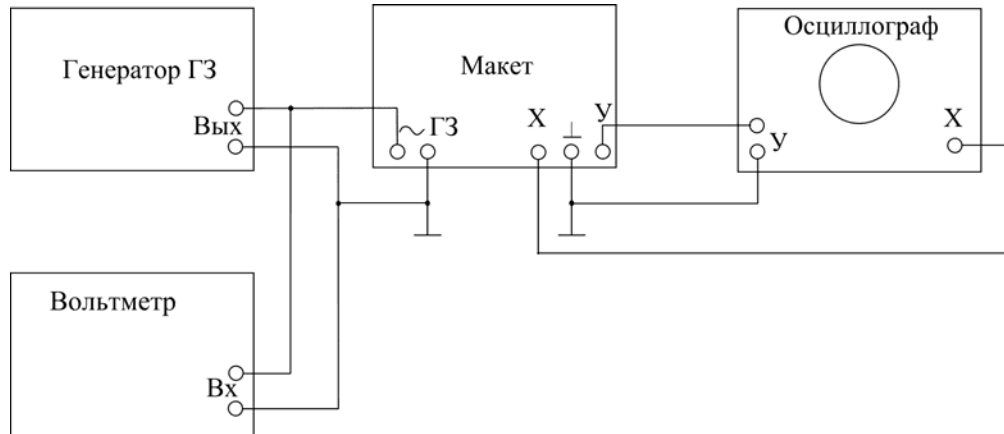


Рис. 11

Подключить к макету генератор и осциллограф. Переключатель П1 установить в положение “ФНЧ”. Подать напряжение от звукового генератора величиной 3 В и частотой 10-20 Гц. Контроль входного сигнала осуществлять вольтметром и поддерживать постоянным на всех частотах. Сигнал на входе RC - фильтра не превышает 100 мВ, на входе активного фильтра – 1В. Установить на экране осциллографа сигнал величиной 4-5 клеточек (чувствительность осциллографа – 0,05 В/см, для активного фильтра – 0,5 В/см).

Снимать зависимость выходного сигнала от частоты в мм отклонения. Частоту менять от 0 до 3 кГц.

При снятии характеристики особо зафиксировать значения граничной частоты, $f_{зр}$, на которой $U_{вых} = 0,707 U_{вх}$ и значение коэффициента передачи на частоте, равной $2 f_{зр}$.

Построить график зависимости нормированного коэффициента передачи от логарифма частоты:

$$K(\lg f) = \frac{U_{вых}(мм)}{[U_{вых}(мм)]_{max}}$$

Крутизна затухания характеристики на октаву определяется по формуле

$$S = 20 \lg \frac{K(f_{зр})}{K(2f_{зр})} \text{ дБ / окт}$$

где $K(f_{зр})$ – коэффициент передачи на граничной частоте,

$K(2f_{зр})$ - коэффициент передачи на частоте в 2 раза большей (для фильтра ВЧ берем частоту в два раза меньше граничной).

МЕТОДИКА СНЯТИЯ ФАЗОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Собрать блок-схему (рис. 12)

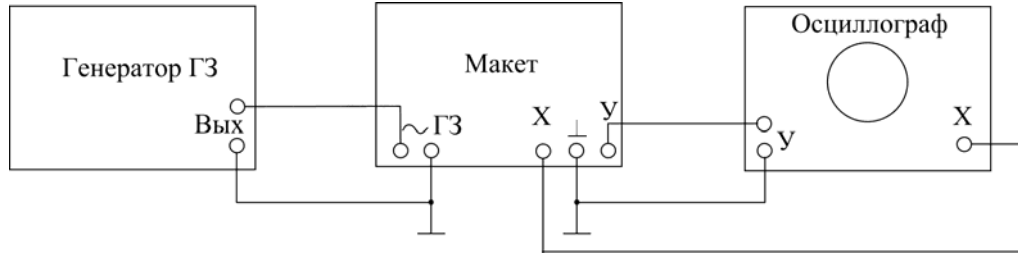
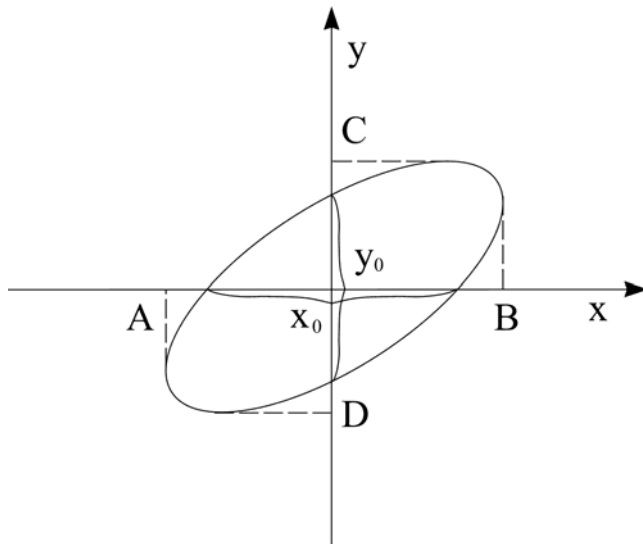


Рис. 12

На экране осциллографа появится эллипс.

Фаза подсчитывается с помощью фигуры Лиссажу эллипса по формуле

v.



$$\sin \varphi = \frac{X_0}{AB} = \frac{Y_0}{CD}$$

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{X_0}{AB}\right) = \quad (1)$$

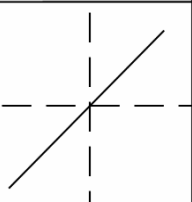
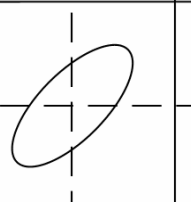
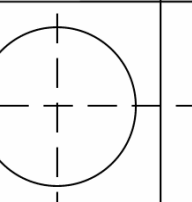
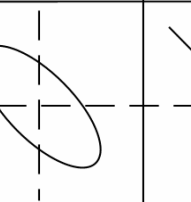
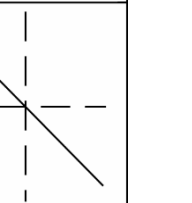
$$= \arcsin\left(\frac{Y_0}{CD}\right)$$

По результатам измерений построить фазовые характеристики

$$\varphi = f(lgf)$$

В табл. 2 приведены зависимость изменения положения эллипса от сдвига фазы между входным и выходным сигналами:

Таблица 2

| φ^0 | 0 | 45 | 90 | 135 | 180 |
|-------------|---|---|--|---|---|
| |  |  |  |  |  |
| | $\varphi = \pm \arcsin \frac{X_0}{AB}$ | | $\varphi = \pm (\pi - \arcsin \frac{X_0}{AB})$ | | |

При вычислении угла следует брать знак – для фильтра НЧ, знак + для фильтра ВЧ.

VI. 1. ТАБЛИЦЫ И ГРАФИКИ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК.

2. Таблицы и графики фазовых характеристик.
3. Значения граничных частот частоты режекции, крутизны затухания характеристики.
4. Выводы.

VII. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Конструктивно-технологические особенности пленочных резисторов; используемые материалы, методы нанесения пленок и контроль их толщины, геометрические конфигурации, методы изготовления точных резисторов; подгонка резисторов под номинал. Электрические свойства пленочных резисторов.
2. Конструктивно-технологические особенности пленочных индуктивностей.
3. Конструктивно-технологические особенности пленочных конденсаторов: используемые материалы, методы нанесения пленок. Электрические свойства пленочных конденсаторов.
4. Свойства RC- структур. Основные электрические параметры и характеристики. Применение RC- структур для построения устройств частотной селекции.
5. Гибридно-интегральные схемы, конструкция.
6. Особенности активных фильтров.

VIII. ЛИТЕРАТУРА

1. Колосов Л.Н. Введение в инженерную микроэлектронику. М., “Сов.радио”, 1974г.
2. Ефимов И.Е., Козырь И.Я. Основы микроэлектроники. М., “Связь”, 1975г.
3. А.А.Колосов, Ю.И.Горбунов, Ю.С.Наумов Полупроводниковые твердые схемы. М. “Сов. Радио” 1965г.
4. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники. М., “Сов. Радио” 1980г.
5. Овечкин Ю.А. Микроэлектроника. М., “Радио и связь”, 1982г.
6. Знаменский А.Е., Теплюк И.Н., Активные RC-структуры. М., “Связь”, 1970, стр.165-173.
7. Хьюлсман Л.П. Активные фильтры М. “Мир” 1972, стр. 85