

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

КУЙБЫШЕВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ имени акад. С.П.КОРОЛЕВА

ИЗУЧЕНИЕ ТРАНЗИСТОРНОГО ЧМ АВТОГЕНЕРАТОРА

Методические указания к лабораторной работе № 8

КУЙБЫШЕВ 1983

УДК 621.396.61

Методические указания к лабораторной работе № 8 являются составной частью цикла лабораторных работ по курсу "Радиопередающие устройства и квантовая электроника".

Рассматриваются основные методы осуществления частотной модуляции в транзисторных автогенераторах. Рассмотрены две схемы осуществления частотной модуляции ЧМ на варикапах и ЧМ на диодах, работающих в ключевом режиме.

Предназначены для студентов четвертого курса специальности 0701.

Составитель Л.В.Макарова

Лабораторная работа № 8

"Изучение транзисторного ЧМ автогенератора".

Целью лабораторной работы является :

- 1) Изучение способов управления частотой одноконтурного АГ на полупроводниковом триоде;
- 2) Изучение статических модуляционных характеристик АГ с двумя видами частотных модуляторов: ЧМ на варикапах и ЧМ на диодах в ключевом режиме.

I. Краткая теория

I. I. Введение

Безинерционное управление частотой АГ по заданному закону необходимо при осуществлении частотной модуляции, частотной и фазовой автоподстройки частоты и решении других радиотехнических задач. Обычно при этом требуется, чтобы отсутствовала (или не превышала определенной величины) паразитная амплитудная модуляция, а стабильность частоты в режиме молчания была высокой.

Глубина паразитной амплитудной модуляции колебаний АГ сильно зависит от напряженности режима его работы. При перенапряженном режиме паразитная АМ невелика, но нестабильность средней частоты колебаний значительна. Поэтому стабильные диапазонные АГ обычно работают в недонапряженном режиме.

Частота колебаний АГ ω близка к собственной частоте колебательного контура ω_0 . Отклонение ω от ω_0 находится из уравнения баланса фаз АГ и зависит от фазы коэффициента обратной связи U_{oc} , фазы средней крутизны и затухания контура δ :

$$\omega = \omega_0 \left[1 + \frac{C}{C_0} (U_{c1} - U_{c2}) \right]$$

Управлять частотой автоколебаний можно меняя ω_0^2 , U_{c1} , U_{c2} или $\tilde{\sigma}$. Воздействие на ω_0 является наиболее эффективным способом изменения частоты автоколебаний. В исследуемых частотных модуляторах управление частотой осуществляется путем изменения эквивалентной емкости контура с помощью модулятора, присоединяемого к контуру. В данной работе изучаются:

- а) частотный модулятор с использованием емкости запертого р-п перехода;
- б) модулятор с полупроводниковыми диодами, работающими в ключевом режиме и позволяющими изменять среднее время подключения постоянной емкости к контуру.

Частотные модуляторы с реактивными транзисторами (аналоги реактивных ламп) оказываются более сложными, чем модуляторы с диодами, и применяются редко. Использование модуляторов с ферритами и варикондами приводит к существенному снижению стабильности частоты автоколебаний, поэтому они применяются лишь в случаях, когда необходимо получать большие девиации частоты при невысоких требованиях к ее стабильности.

1.2. Частотный модулятор на емкости запертого р-п перехода.

Величина барьерной емкости р-п перехода зависит от величины приложенного к ней запирающего напряжения. Выражение для емкости резкого перехода можно записать в виде:

$$C = C_0 \sqrt{\frac{\varphi}{\sigma \cdot \epsilon_n}} \quad (I)$$

где φ - контактная разность потенциалов

$$(\varphi > 0);$$

ϵ_n - запирающее напряжение на переходе ($\epsilon_n < 0$);

C_0 - емкость перехода, $\epsilon_n = 0$.

Важно отметить, что пределы изменения E_n ограничены. Чтобы р-п переход был заперт, E_n должно быть отрицательным. С другой стороны E_n по абсолютной величине не должно превышать пробивного напряжения E_{ng} . Таким образом запертый полупроводниковый диод характеризуется тремя параметрами:

C_0 , β и E_{ng} (В справочнике E_{ng} дано по модулю).

В частотных модуляторах АГ КВ и СВ диапазонов используются закрытые резкие переходы стабилитронов Д808-Д814 и специальных диодов-варикапов Д901-Д902. Параметры диодов приведены в таблице I.

Таблица I

ТИП диода	Д808	Д809	Д811	Д813	Д814А	Д801В	Д901Е	КВ-104Б
$C, [Пф]$	720	460	240	350	350	190	210	290
$\varphi [В]$	0,77	0,85	0,89	0,94	0,92	0,98	0,82	0,83

Основные свойства генератора с ЧМ определяются его модуляционной характеристикой - зависимостью отклонения частоты от модулирующего напряжения. Чтобы изучить ее, рассмотрим процессы в част-ом модуляторе с р-п переходом, к которому приложена сумма, постоянного напряжения E_n ($E_n < 0$), модулирующего напряжения с частотой Ω и амплитудой $V_{n\Omega}$ и высокочастотного напряжения с частотой ω и амплитудой V_n :

$$e_n = E_n + V_{n\Omega} \cos \Omega t + V_n \cos \omega t$$

Чтобы ЧМ не сопровождалась паразитной АМ, мгновенное напряжение на диоде должно удовлетворять следующим условиям:

- а) должно быть отрицательным, б) не должно превышать по абсолютной величине E_{ng} .

Эти условия удовлетворяются, если выполнены неравенства:

$$\begin{aligned} E_n + V_{n\Omega} + V_n &\leq 0 \\ |E_n - V_{n\Omega} - V_n| &\leq E_{ng} \end{aligned} \quad (2)$$

В данной работе ставится задача - получить максимальную

девиацию частоты в АГ при заданной амплитуде напряжения на контуре и заданном варикапе. При этом модуляционная характеристика может иметь значительную нелинейность, т.е. такая постановка задачи о расчете модулятора пригодна, если не предъявляются жесткие требования к линейности характеристики.

Примем следующие обозначения:

C_k - полная емкость контура АГ с учетом начальной емкости варикапа C_m ;

L_k - полная индуктивность контура;

ΔC - отклонение емкости варикапа от значения соответствующего

$$C_n = E_n ;$$

P_0 - коэффициент включения варикапа в контур при $\Delta C = 0$.

Будем считать, что $Y_{kc} = Y_k = 0$ и, следовательно, $\omega = \omega_0$.

Далее под ω_0 будем подразумевать собственную частоту (или частоту автоколебаний) при $\Delta C = 0$: $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_k C_k}}$

Если изменения емкостной проводимости варикапа $\omega_0 \Delta C$ мало по сравнению с реактивной проводимостью ветви контура, параллельно которой он включен, то вызванное изменением проводимости отклонение частоты от ω_0 (девиация частоты) определяется формулой :

$$\frac{\Delta \omega}{\omega_0} = -\frac{1}{2} P_0^2 \frac{\Delta C}{C_k} \quad (3)$$

Выражение (3) вместе с зависимостью $\Delta V(E_n)$, вытекающей из (1), определяет модуляционную характеристику генератора.

Максимальная девиация может быть достигнута при выборе оптимального коэффициента включения варикапа в контур

$$P_0 = P_{0opt} .$$

Существование этого оптимума ожидается из следующих соображений.

В.ч. напряжение на варикапе пропорционально P_0 и V .

$$(4).$$

Из (3) видно, что при малых P_0 и ограниченном изменении емкости ΔC отклонение частоты $\Delta \omega$ от ω_0 будет мало. Стремление увеличить $\Delta \omega$ за счет увеличения P_0 приводит, в силу (4), к росту ВЧ напряжения U_n на p - n переходе. Из-за ограничения (2) увеличение U_n приводит к уменьшению допустимых изменений НЧ напряжения на переходе (сравним рис.1а и рис.1б), а значит и к уменьшению допустимых ΔC . Расчет максимальной девиации частоты, результаты которого показаны на рис.2 подтверждают существование $P_0 \text{ опт.}$. Оказывается, что в первом приближении оптимальный коэффициент включения зависит только от состояния U к e_{ng} и может определяться по одной из двух формул:

$$P_{0 \text{ опт.}} \approx \begin{cases} 1, & \text{если } \frac{U}{e_{ng}} \leq \frac{1}{3} \\ \frac{e_{ng}}{3U}, & \text{если } \frac{U}{e_{ng}} > \frac{1}{3} \end{cases} \quad (5).$$

Расчет графиков для максимальной девиации $\Delta \omega_{\text{max}}$ (рис.2) был приведен не по приближенной формуле (3), а по более точной, которая следует из формулы Томпсона и зависимости $C(e_n)$ (I) с учетом ограничений (2).

Простейшие схемы включения варикапов в контур показаны на рис.3. Связь модулятора с контуром может быть сделана емкостной (рис.3а), автотрансформаторной (рис.3б) или комбинированной. Резисторы R_1 и R_2 на рис.3 предназначены для установки рабочей точки, модулятора (т.е. средней частоты). Дроссель L_{5n} отделяет ВЧ часть от цепей питания и НЧ входа. В данной лабораторной работе применена емкостная связь частотного модулятора с контуром АГ.

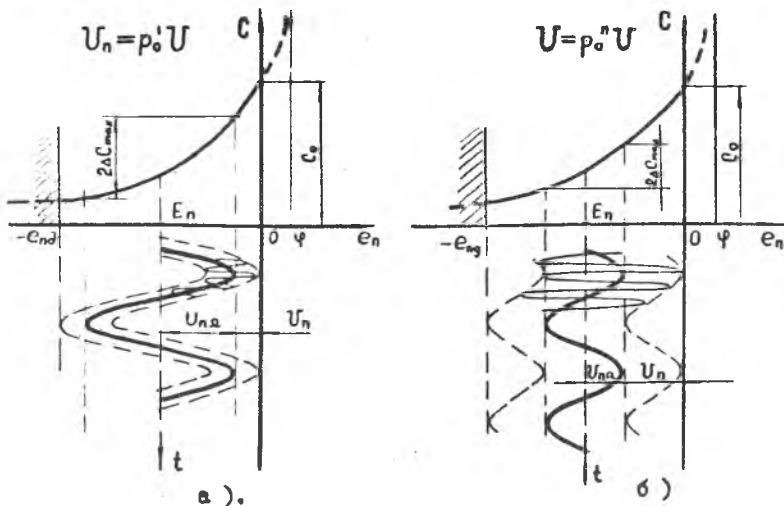


Рис. 1. Характеристика варикапа и приложенные к нему напряжения при разных величинах

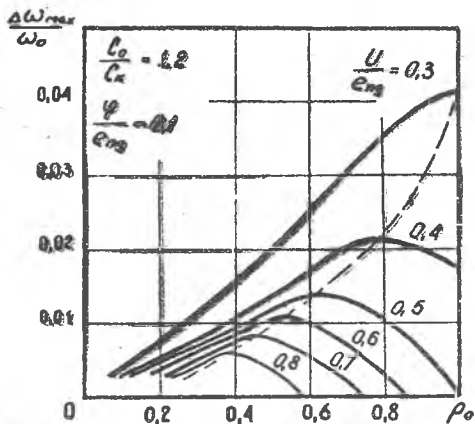


Рис. 2. Зависимости максимальной относительной девиации частоты от коэффициента включения модулятора при разных амплитудах в.ч. напряжения на контуре ЛТ

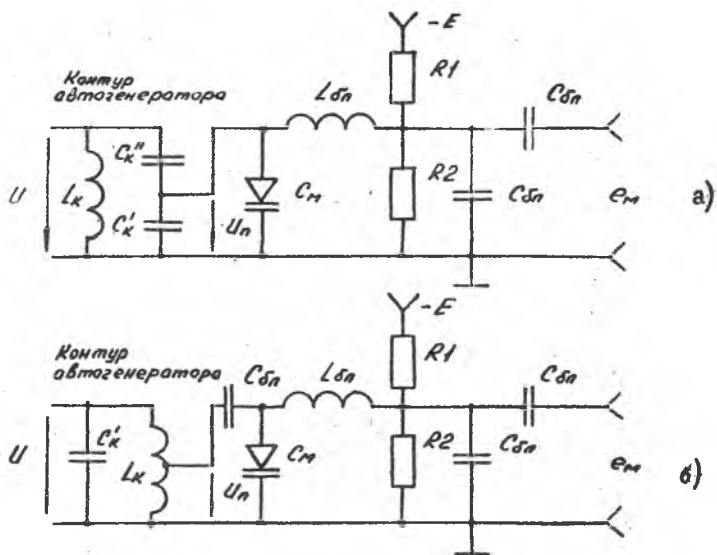


Рис.3. Схемы связи частотного модулятора с контуром автогенератора :

а). емкостная ; б). автотрансформаторная

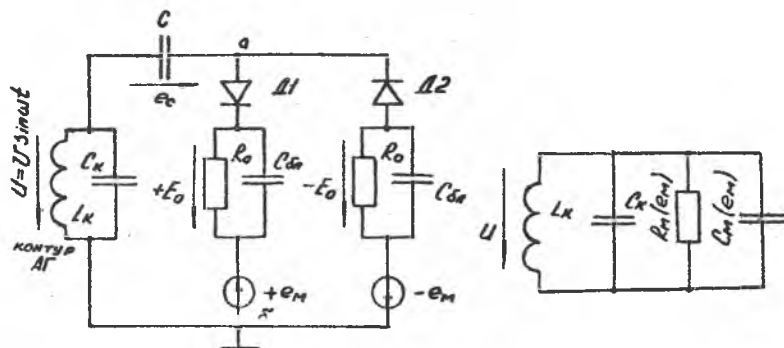


Рис.4. Двухтактное включение диодов , работающих в ключевом режиме :

а) принципиальная схема ; б) схема замещения

1.3 Частотный модулятор на диоде, работающем в ключевом режиме

Если к линейности модуляционной характеристики предъявляются жесткие требования, то в ряде случаев оказывается целесообразным применить частотный модулятор с диодами в ключевом режиме. Такой модулятор позволяет получать большие значения девиаций частоты, чем модулятор на емкости р-п перехода.

При использовании модуляторов на диодах, выполняющих функции вентиля (вакуумные или полупроводниковые диоды), к контуру АГ через диоды подключается емкость C или индуктивность L . Модуляция частоты осуществляется за счет угла отсечки, т.е. времени подключения C или L к колебательному контуру. При этом прямое и обратное сопротивления диода не оказывают существенного влияния на стабильность средней частоты АГ, если первое значительно меньше, а второе значительно больше подключаемого реактивного сопротивления ($\frac{1}{\omega C}$ или ωL). Для улучшения линейности модуляционной характеристики в таких модуляторах применяют двухтактное включение диодов, показанное на рис. 4а (для простоты на этом рисунке модулятор подключен ко всему контуру $P=I$). Противоположные модулирующие направления $\pm e_m$ и напряжения на сопротивлениях автосмещения (R_0) $\pm E_0$ можно считать практически неизменными в течении периода высокой частоты.

Рассмотрим работу модулятора, используя временные диаграммы напряжения и токов (рис. 5). Пусть напряжение на контуре синусоидально

$$u = U \sin \omega t \quad (6),$$

а напряжение на емкости в момент $t = 0$ равно e_c . (ниже будет показано, что это напряжение остается постоянным, пока оба диода закрыты).

Условия отпирания диода D_1 в левой ветви модулятора имеет вид

$$u - e_c - (E_c + e_m) > 0. \quad (7)$$

После того, как диод открылся, сопротивление участка "ab" (рис. 4а) для тока с частотой ω равно нулю и ток i_c через емкость C определяется по формуле:

$$i_c = C \frac{du}{dt} = \omega C U \cos \omega t \quad (8).$$

В момент, когда $\omega t = \frac{\pi}{2}$, $U \cos \omega t$ достигает значения U , а ток через емкость C обращается в нуль, напряжение на емкости такое, что

$$e_c + (E_c + e_m) = U \quad (9)$$

При дальнейшем изменении $u(t)$ оно оказывается меньше, чем U , и условие отпирания диода нарушается.

Таким образом, диод отпирается в момент $\omega t = \varphi$, определяемый (7) с учетом (6):

$$\sin \varphi = \frac{e_c + (E_c + e_m)}{U} \quad (10).$$

и запирается, когда $\omega t = \frac{\pi}{2}$. Изменение фазы напряжения на контуре за время протекания тока

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \varphi \quad (11)$$

назовем углом отсечки диодного модулятора. Из (10) и (11) получим

$$\cos \theta = \frac{e_c + (E_c + e_m)}{U} \quad (12).$$

В (12) неизвестно e_c , т.е. напряжение на конденсаторе C , оставшееся после запираания правой ветви модулятора. Его можно определить, если заметить, что после запираания левой ветви в силу (9)

$$e_c = U - (E_c + e_m).$$

Рассуждениями, аналогичными тем, которые привели к соотношению (9) легко показать, что в момент запираания диода D_2

и, следовательно, к моменту отпирания диода D_1

$$e_c = -U + (E_0 + e_M) \quad (I3).$$

Таким образом, условие отпирания левой ветви модулятора (7) приобретает вид

$$U > -U + 2(E_0 + e_M) \quad (I4).$$

Уровень напряжения отпирания левой ветви модулятора показан на временной диаграмме рис.5а пунктиром.

Из соображений симметрии очевидно условие отпирания правой ветви

$$U < U - 2(E_0 + e_M).$$

Диаграммы тока $i_c(t)$, показанные на рис.5в, получены с использованием условий отпирания и запираания диодов и выражения (8). Из (I2) и (I3) получим выражение для косинуса угла отсечки

$$\cos \theta = -1 + \frac{2(E_0 + e_M)}{U} \quad (I5).$$

Напряжения $\pm E_0$ получаются за счет прохождения постоянных составляющих I_0 токов диодов D_1 и D_2 через сопротивление R_0 .

Вычислив I_0 при известных U и C , найдем

$$E_0 = \frac{1}{2} U M (1 - \cos \theta), \quad (I6)$$

где $M = \frac{1}{\pi} \omega C R_0$ (I7).

Подставляя (I6) в (I5), найдем

$$\cos \theta = \frac{M-1}{M+1} + \frac{2e_M}{(M+1)U} \quad (I8),$$

если R_0 выбрано так, что $M \neq 1$, то при $e_M = 0$ угол отсечки $\theta = 90^\circ$ и модуляционная характеристика оказывается наиболее линейной, при этом

$$\cos \theta = \frac{e_M}{U} \quad (I9).$$

Для расчета модуляционной характеристики нужно опреде-

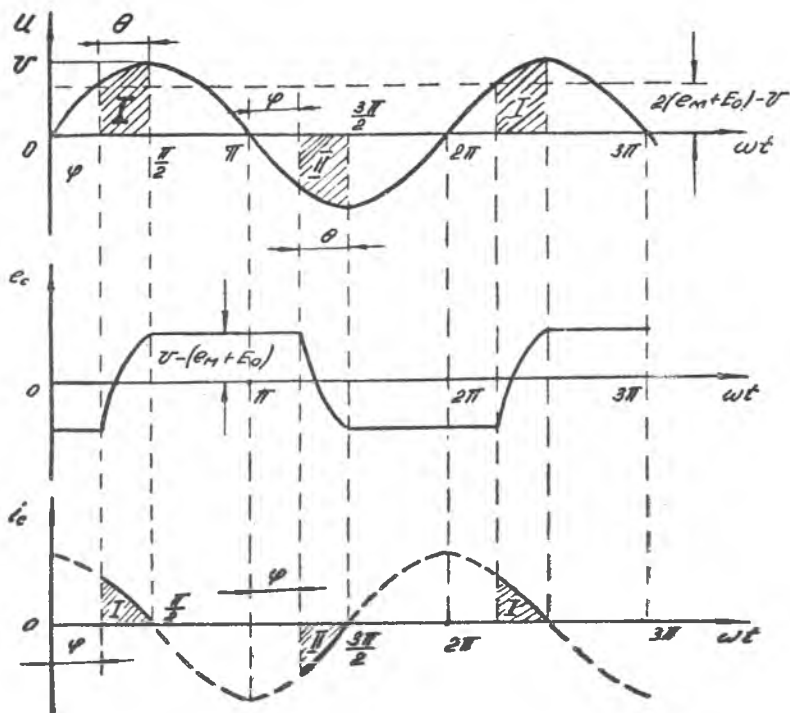


Рис. 5. Эшры напряжений и тока для диодного модулятора .

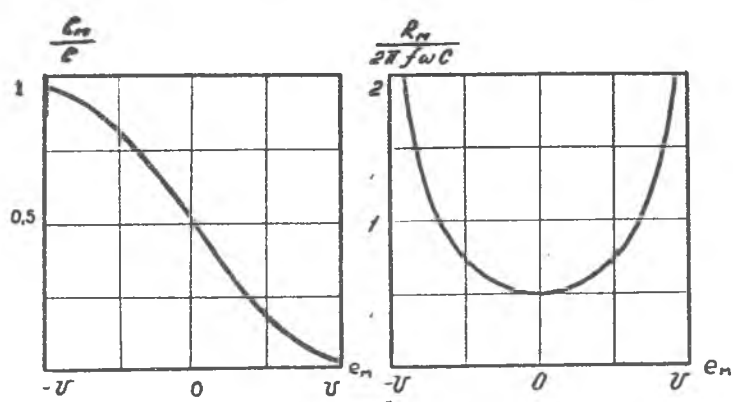


Рис. 6. Зависимости $\frac{C_m}{c}$ и $\frac{R_m}{2\pi f w c}$ от модулирующего напряжения

лить первую гармонику тока через емкость C . Как видно из временных диаграмм рис.5, сдвиг фазы первой гармоники тока через модулятор не равен $\frac{\pi}{2}$. Поэтому входное сопротивление модулятора имеет реактивную и активную компоненты. Вычисление первой гармоники тока модулятора показывает, что реактивную компоненту входного сопротивления модулятора можно характеризовать управляемой емкостью $C_M(\theta)$:

$$C_M = C f_1(\theta) \quad , \quad (20)$$

а активную сопротивлением R_M , зависящим от e_M (рис.4б):

$$R_M = \frac{1}{\omega C} \cdot \frac{2\pi}{1 - \cos\theta}$$

Формулы (19) и (20) определяют вид зависимости $C_M(\theta)$

при $M=1$. Такая зависимость приведена на рис.6а. Обозначили через C_{M0} емкость модулятора в режиме молчания, т.е. при $e_M=0$, через ΔC_M отклонение C_M от C_{M0}

$$\Delta C_M = C_M - C_{M0} = C_M - \frac{1}{2}C \quad (\text{для } \theta=90^\circ).$$

Полная емкость контура в режиме молчания (рис.4)

$$C_K = C_K' + C_{M0} = C_K' + \frac{1}{2}C.$$

Тогда зависимость ω от ΔC_M имеет вид

$$\omega = \omega_0 \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\Delta C_M (e_M)^2}{C_K}}} \quad (22).$$

Она представляет модуляционную характеристику ЧМ АГ, если ω рассматривать как функцию от e_M .

Для оценки нелинейных искажений можно, пользуясь (19) и (20), представить $C_M(e_M)$ в виде отрезка степенного ряда в окрестности $C_M = C_{M0} = \frac{1}{2}C$

$$C_M = C \left[\frac{1}{2} - \frac{2}{\pi} \left(\frac{e_M}{V} \right) + \frac{1}{2\pi} \left(\frac{e_M}{V} \right)^3 \right]$$

Для оценки паразитной АМ необходимо знать зависимость $R_M(e_M)$

Она определяется из (19) и (21) и представлена на рис.6б.

Следует заметить, что в случаях, когда эта модуляция оказывается значительной, необходимо учитывать влияние амплитуды $v(u)$ в процессе модуляции на форму модуляционной характеристики.

2. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА МАКЕТА

Автогенератор, показанный на рис. 7, собран по схеме с заземленной базой на транзисторе КТ315 ($V18$). Частота автоколебаний выбрана равной 1,05 МГц.

В первом модуляторе используется нелинейная емкость варикала КВ-104Б ($V17$). Модулятор выполнен в соответствии со схемой, показанной на рис. 3а. Переключателем $S2$ (Диапазон) осуществляется подключение модулятора с разными коэффициентами включения (μ). Коэффициенты включения модулятора в положениях переключателя 4 "1", "2", "3" соответственно равны 0,64; 0,5; 0,36.

Емкости делителей подобраны так, чтобы при любом μ частоты в режиме молчания были одинаковы.

Второй модулятор выполнен в соответствии со схемой рис. 4а. Особенностью схемы является то, что питание модулятора осуществляется не двумя противофазными напряжениями $\pm E$, а лишь одним общим.

Подключение модулятора осуществляется так же $S2$ (Диапазон). В положении "4" $C11 = 360$ пф, в положении "5" $C7 = 560$ пф. В качестве ключевых диодов используются диоды типа $D311$. На резисторах $R2 = 2R_0'$ и $R0 = 2R_0''$ напряжение создается за счет автосмещений. В положении "А"

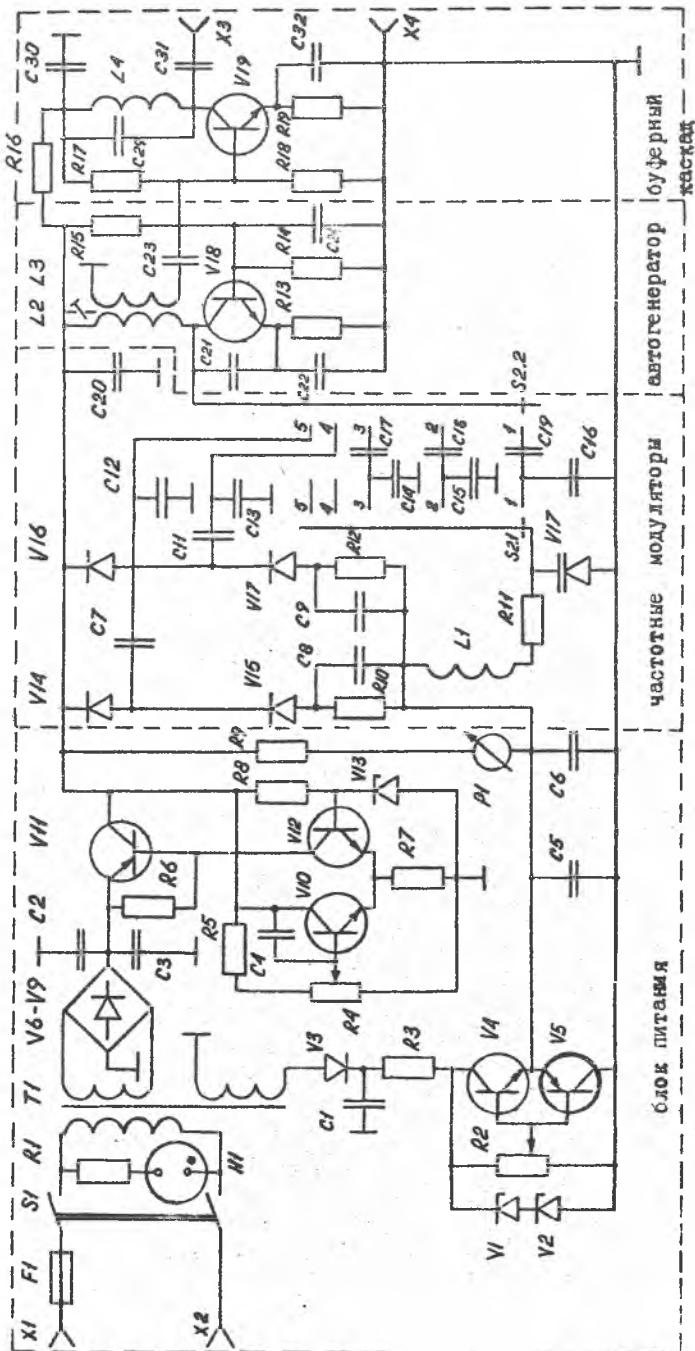


Рис. 7. Принципиальная схема лабораторного макета

переключателя $\mathcal{A}2.2$ $R_{I2} = 8,2 \text{ кОм}$, в положении "5"

$R_{I0} = 15 \text{ кОм}$, что позволяет сохранить

$$M = f = \frac{\omega C_0 R}{\pi}$$

Смещение на оба модулятора подается с потенциометра $\mathcal{E}2$ питаемого напряжения $E = 24 \text{ В}$. Ручка регулировки $\mathcal{E}2$ выведена на переднюю панель макета (Смещение). Величина смещения контролируется измерительным прибором.

3. ЗАДАНИЕ

3.1. Выполняется при подготовке.

3.1.1. Нарисовать схемы АГ с заземленной базой и частотных модуляторов с варикапом и ключевыми диодами.

3.1.2. Рассчитать оптимальный коэффициент включения $\beta_{\text{опт}}$ варикапа в контур АГ, если напряжение на контуре АГ $U = 5 \text{ В}$ и в качестве варикапа применен КВ 104В (см. таблицу I).

Рассчитать величины емкостей контура АГ C_k^1 и C_k^2 (см. рис. 3а) для оптимальной величины $\beta_{\text{опт}}$, считая $L_k = 38 \text{ мкГ}$, а частоту генерации в режиме молчания $f_0 = 1,5 \text{ МГц}$.

3.1.3. Нарисовать графики ожидаемой зависимости изменения частоты и амплитуды колебаний АГ от модулирующего напряжения для двух модуляторов.

3.2. Выполняется в лаборатории.

3.2.1. Включить макет и приборы в сеть.

3.2.2. Поставить переключатель "диапазон" на макете в положение "I".

3.2.3. Изменением смещения на варикапе получить частоту колебаний $1,05 \text{ МГц}$

3.2.4. Ручкой "Время индикации" частотомера добиться времени индикации измеренной частоты 0,5 - 1 с.

3.2.5. Снять по точкам зависимости $f, U, (E_{cm})$ для модулятора на варикапе при трех значениях ρ_0 (положение переключателя "Диапазон" "1", "2", "3"). Обратить внимание на то, как влияет изменение коэффициента включения ρ_0 на модуляционные характеристики.

3.2.6. Снять зависимость $f, U (E_{cm})$ для положений "4" и "5", в этом случае к контуру АГ подключается модулятор на диодах, работающих в ключевом режиме.

3.2.7. Результаты измерений занести в таблицу. Построить графики $f, U (E_{cm})$ при пяти положениях переключателя.

Контрольные вопросы

1. Пояснить принцип действия частотного модулятора с варикапом.
Указать достоинство и недостатки модулятора.
2. Объяснить принцип действия частотного модулятора на ключевых диодах. Достоинство и недостатки. Сопоставить одно- тактный и двухтактный модулятор.
3. Нарисовать автогенератор по схеме емкостной трехточки с заземленным коллектором и частотным модулятором на варикапе. Показать включение источников питания и измерительных приборов.
4. Начертить автогенератор по схеме индуктивной трехточки с заземленной базой и модулятором на ключевых диодах.
5. Нарисовать и сопоставить статические и модуляционные характеристики модулятора на варикапе:
 - а) для двух значений напряжения на контуре АГ;
 - б) для двух значений коэффициента включения варикапа в контур;
 - в) для двух типов варикапов с разными пробивными напряжениями.
6. Нарисовать и объяснить зависимость относительной девиации частот от коэффициента включения варикапа в контур АГ при разных амплитудах U .
7. Нарисовать и сопоставить статические и модуляционные характеристики модулятора на ключевых диодах $f, U(\varphi_m)$ при двух значениях C .
8. Нарисовать зависимости $C_m, R_m(\varphi_m)$

Литература

1. Чудаков П.М. Частотная модуляция с помощью емкостей р-п переходов, "Связь", 1968, стр.22...25, 51...56
 2. "Радиопередающие устройства" под редакцией М.В.Благоуспенского, Г.М.Уткина, Москва, "Радио и связь", 1963г.
 3. Лабораторный практикум по радиопередающим устройствам, ч. I, МЭИ, Москва, 1973г.
-

Составитель: Любовь Васильевна Макарова

ИЗУЧЕНИЕ ТРАНЗИСТОРНОГО ЧМ АВТОГЕНЕРАТОРА

Методические указания к лабораторной работе № 8

Подписано в печать.

Формат 60x84 1/16. Бумага оберточная белая.

Оперативная печать. Усл.п.л. I,16. Уч.-изд.л. I,0.

Т.50 Заказ № 203 Бесплатно.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени авиационный институт им.С.П.Королева, г.Куйбышев, ул.Молодогвардейская 151.

Офсетный участок КуАИ, г.Куйбышев, ул.Ульяновская, 18.