

НПО УЧЕБНОЙ ТЕХНИКИ «ТУЛАНАУЧПРИБОР»

МЕТОДИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО ПО ВЫПОЛНЕНИЮ
ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ



УГИФС-1

ГЕНЕРАТОР С ВНЕШНИМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ.

Тула, 2010 г.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА.

ГЕНЕРАТОР С ВНЕШНИМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ.

Цель работы: исследовать теоретические принципы построения схемы, свойств, режимов работы и определение параметров и характеристик ВЧ усилителя мощности.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ.

Введение.

Генератором с внешним возбуждением называется радиоэлектронное устройство, предназначенное для преобразования энергии постоянного тока в энергию электромагнитных колебаний высокой частоты, равной или кратной частоте входного воздействия. В том случае, когда частота выходного сигнала равна частоте входного воздействия, генератор с внешним возбуждением называется *усилителем мощности*. Если же частота выходного сигнала в целое число раз больше частоты входного – речь идет об *умножителе частоты*.

Основное требование, предъявляемое к генератору с внешним возбуждением (ГВВ), – получение высокого коэффициента полезного действия (КПД) при обеспечении заданной мощности в нагрузке. Это накладывает определенные ограничения на выбор режима работы генераторного прибора (ГП) и параметров согласующей цепи.

Благодаря присутствию высших гармоник в токе ГП при его работе в нелинейном режиме ГВВ можно использовать в качестве умножителя частоты (УЧ). УЧ предназначены для преобразования колебаний с частотой ω в колебания кратной частоты $n\omega$, где n – любое целое положительное число. Применение УЧ позволяет повысить стабильность частоты задающих генераторов, расширить диапазон рабочих частот или получить множество стабильных частот в синтезаторах частоты, увеличить индекс частотной (фазовой) модуляции, повысить устойчивость работы радиопередатчика. Согласующая цепь обеспечивает трансформацию в общем случае комплексного сопротивления нагрузки в чисто резистивное сопротивление в заданном диапазоне частот, причем имеющее такое значение, при котором обеспечиваются высокие энергетические показатели ГВВ.

Так как требование высокого КПД генератора обуславливает работу ГП в нелинейном режиме, при котором в коллекторном токе ГП содержатся высшие гармоники, то согласующая цепь кроме того обеспечивает необходимое подавление высших гармоник в нагрузке, т. е. осуществляет фильтрацию.

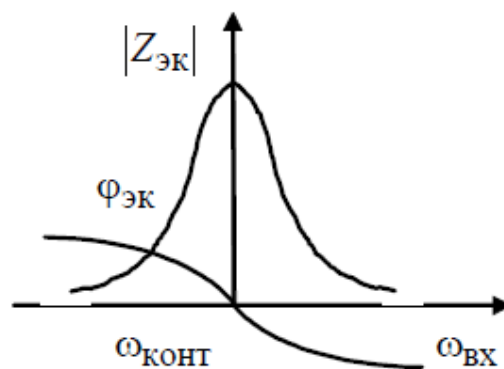


Рис. 1.1

Одной из простейших согласующих цепей является параллельный колебательный контур с достаточно высокой добротностью, включенный в коллекторную цепь усилителя мощности (УМ). Контур обеспечивает не только согласование генератора с нагрузкой вблизи резонансной частоты, но и малое сопротивление $Z_{ЭК}$ для высших гармоник коллекторного тока, что обуславливает гармоническую форму напряжения на контуре (рис. 1.1). Эквивалентное сопротивление настроенного в резонанс контура носит резистивный характер и может быть записано следующим образом:

$$R_{ЭК} = p^2 R_{э0} = p^2 \rho^2 / (r_{кон} + r_{вн}), \quad (1.1)$$

где $p = \frac{U_{к}}{U_{кон}}$ – коэффициент включения контура в коллекторную цепь генератора; $\rho = 2\pi f L_{кон} = \frac{1}{2\pi f C_{кон}}$ – волновое сопротивление ($C_{кон}$, $L_{кон}$ – полные индуктивность и емкость контура); $r_{кон}$ – собственное сопротивление потерь контура; $r_{вн}$ – сопротивление, вносимое нагрузкой.

При гармонических напряжениях возбуждения (базы) $U_6(t)$ и коллектора $U_{к}(t)$ коллекторный ток имеет форму периодической последовательности импульсов, которая может быть представлена рядом Фурье:

$$i_{к}(t) = I_{к0} + I_{к1} \cos \omega t + I_{к2} \cos 2\omega t + \dots + I_{кn} \cos n\omega t + \dots$$

Значения $I_{к0}$ и $I_{кn}$ на практике определяют через нормированные коэффициенты разложения: $\alpha_0 = I_{к0}/i_{кm}$ и $\alpha_{0n} = I_{кn}/i_{кm}$, являющиеся функциями лишь угла отсечки коллекторного тока θ .

Полезная мощность, выделяемая на контуре 1-й гармоникой коллекторного тока: $P_1 = 0,5 I_{к1} U_{к}$. Мощность, потребляемая от источника коллекторного питания, определяется как $P_0 = E_{к} I_{к0}$.

КПД генератора по коллекторной цепи:

$$\eta = P_1/P_0 = 0,5(I_{к1}/I_{к0})(U_{к}/E_{к}) = 0,5\gamma(\theta)\xi, \quad (1.2)$$

где $\gamma = \alpha_1(\theta)/\alpha_0(\theta)$ – коэффициент формы импульса тока; $\xi = U_{к}/E_{к}$ – коэффициент использования коллекторного напряжения.

Выражение (1.2) показывает, что для повышения КПД целесообразно работать при высоких значениях ξ , а угол отсечки коллекторного тока θ должен быть достаточно мал для получения высокого значения $\gamma(\theta)$. Максимальное значение КПД достигается при углах отсечки, близких к нулю, однако при этом резко снижается выходная мощность за счет стремления $\alpha_1(\theta)$ к нулю. Поэтому практически в схемах угол отсечки выбирают в интервале $75^\circ < \theta < 100^\circ$. В ряде случаев, например при усилении амплитудно-модулированных колебаний или

при умножении частоты, при выборе θ необходимо учитывать и дополнительные требования.

В зависимости от степени влияния напряжения выходной цепи на значение и форму импульсов тока ГП различают 3 режима работы: недонапряженный, граничный и перенапряженный. Переход от одного режима к другому может быть осуществлен изменением напряжения на электродах ГП. При постоянных питающих напряжениях и напряжении возбуждения коллекторный ток зависит лишь от переменного напряжения в выходной цепи $u_k(t)$, а следовательно, и от $R_{эк}$, изменять которое можно, например изменением коэффициента включения контура p (см.(1.1)).

Зависимости $I_{к0}$, $I_{к1}$, U_k , P_1 , P_0 , P_k и $\eta = f(R_{эк})$ носят название нагрузочных характеристик генератора. Здесь $P_k = P_0 - P_1$ – мощность, рассеиваемая на коллекторе транзистора.

При низких значениях $R_{эк}$ ($R_{эк} < R_{эк.гр}$ – рис. 1.2, кривые 1 и 2) амплитуда переменного напряжения $U_k = I_{к1} R_{эк}$ мала; остаточное напряжение $u_{кmin}$ велико ($u_{кmin} = E_k - U_k > u_{кmin гр}$); импульс коллекторного тока имеет форму усеченной косинусоиды, а его амплитуда уменьшается с ростом $R_{эк}$ незначительно вследствие малого значения проницаемости ГП. В *недонапряженном режиме* ГП может быть приближенно представлен в виде генератора тока $I_{к1} \approx I_{к1гр}$, и, следовательно, по мере роста $R_{эк}$ от 0 до $R_{эк.гр}$ напряжение U_k , ξ и полезная мощность будут возрастать (в приведенных формулах индекс «гр» указывает на граничный режим работы).

При значении сопротивления $R_{эк} = R_{эк.гр}$ (рис. 1.2, кривая 3) остаточное напряжение на коллекторе $u_{кmin гр} = E_k - U_{к гр}$ уменьшается настолько, что вызывает уплощение вершины импульса коллекторного тока вследствие возрастания базового тока. В *граничном режиме* коэффициент использования коллекторного напряжения

$$\xi_{гр} = 1 - i_{км} / (S_{гр} E_k) \approx 1 - 2P_1 / (S_{гр} \alpha_1(\theta) E_k^2),$$

где $S_{гр}$ – крутизна линии граничного режима.

Для современных мощных высокочастотных транзисторов среднее значение $\xi_{гр} = 0,85 \dots 0,95$, и, следовательно, КПД генератора, работающего при углах отсечки $75^\circ < \theta < 100^\circ$, достигает $0,75 \dots 0,85$. Высокое значение $\xi_{гр}$ обуславливает и высокое значение полезной мощности P_1 , максимум которой примерно соответствует граничному режиму.

При дальнейшем увеличении $R_{эк}$ ($R_{эк} > R_{эк.гр}$) наступает *перенапряженный режим* (рис.1.2, кривая 4). В этом режиме за счет некоторого роста U_k и

уменьшения остаточного напряжения ($u_{к\ min} < u_{к\ min\ гр}$) резко возрастает базовый ток и появляется провал в импульсе коллекторного тока (рис. 1.2, кривая 4).

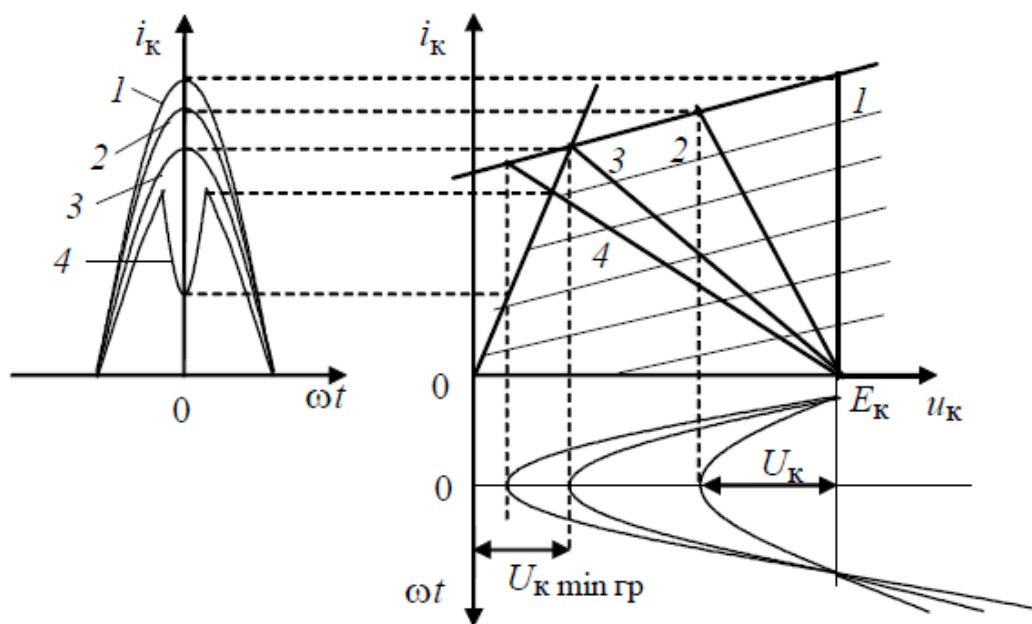


Рис. 1.2

В перенапряженном режиме из-за искажения формы импульса коллекторного тока с ростом $R_{ЭК}$ происходит уменьшение постоянной составляющей $I_{к0}$ и более резкое уменьшение $I_{к1}$, что при незначительном возрастании напряжения U_k приводит к уменьшению полезной мощности P_1 , хотя КПД остается при этом высоким и уменьшается лишь при переходе в сильноперенапряженный режим ($\xi > 1$).

Таким образом, в граничном режиме УМ отдает максимальную мощность в нагрузку при высоком КПД. В перенапряженном режиме практически мало изменяется напряжение U_k , полезная мощность P_1 уменьшается, но КПД остается высоким. Недонапряженный режим энергетически невыгоден, так как ГВВ отдает малую полезную мощность при низком КПД, и, следовательно, мощность, рассеиваемая на коллекторе транзистора, $P_k = P_0 - P_1$ достаточно велика.

Напряженность режима генератора меняется не только при изменении связи контура с коллектором транзистора, но и при его расстройке, когда сопротивление $Z_{ЭК}$ становится комплексным, его модуль уменьшается с расстройкой и появляется фазовый сдвиг между первой гармоникой коллекторного тока и напряжением на контуре (см. рис. 1.1).

Следовательно, расстройка $\Delta\omega$ контура, т. е. выполнение условия $\Delta\omega = \omega_{\text{вх}} - \omega_{\text{конт}} \neq 0$, приводит к переходу в режим с меньшей напряженностью, что вызывает соответствующие изменения $I_{\text{к0}}, I_{\text{к1}}, U_{\text{к}}, P_1, P_0, P_{\text{к}}$ и η . Динамическая характеристика ГП $i_{\text{к}} = f(u_{\text{к}})$ при расстроенном контуре имеет вид отрезка эллипса, а не отрезка прямой, как при чисто резистивной нагрузке. Зависимости $I_{\text{к0}}, I_{\text{к1}}, U_{\text{к}}, P_1, P_0, P_{\text{к}}$ и $\eta = f(\Delta\omega)$ носят название настроечных характеристик генератора.

В радиопередающих устройствах одноконтурная схема выходной цепи усилителя мощности (простая схема выхода) находит ограниченное применение (в основном, в простых маломощных устройствах) ввиду низких фильтрующих свойств и сложности настройки: для изменения рабочей частоты или сопротивления нагрузки для генератора $R_{\text{ЭК}}$ необходимо одновременно перестраивать и элемент связи $X_{\text{СВ}}$, и элемент настройки $X_{\text{Н}}$.

Сложная схема выхода обычно представляется в виде системы двух связанных контуров – антенного с элементом настройки $X_{\text{Н}}$ и промежуточного (коллекторного). В качестве элемента связи между контурами могут выступать конденсатор, катушка индуктивности или взаимная индуктивность между катушками двух контуров.

Динамические характеристики ВЧ генератора на транзисторе.

В ГВВ могут использоваться биполярные и полевые транзисторы.

В биполярных транзисторах происходит перенос как основных носителей заряда в полупроводнике, так и неосновных; в полевых - только основных. Управление током прибора в биполярных транзисторах осуществляется за счет заряда неосновных носителей, накапливаемых в базовой области; в полевых - за счет действия электрического поля на поток носителей заряда, движущихся в полупроводниковом канале, причем поле направлено перпендикулярно этому потоку. Для увеличения мощности прибора в биполярных транзисторах используют многоэмиттерную структуру, а в полевых - многоканальную. Материалом для мощных ВЧ транзисторов обоих типов служит кремний, в СВЧ приборах применяют также арсенид галлия. Задача повышение выходной мощности сигнала и максимальной частоты усиления в полупроводниковом приборе решена путем создания кремниевых и арсенид-галлиевых транзисторов с многоэмиттерной и многоканальной структурой. Другое направление в развитии генераторных транзисторов связано с повышением их линейных свойств при усилении сигналов повышенной мощности. В табл. 1.1 приведены четыре основных параметра - максимальная частота усиления f , выходная мощность P_1 , коэффициент усиления по мощности K_p , КПД нескольких типов ВЧ мощных биполярных и полевых транзисторов. Основные сведения для мощных транзисторов, необходимые для анализа работы ГВВ, приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1

Тип транзистора	Частота, МГц	Мощность P_1 , Вт	Коэффициент усиления, дБ	КПД, %
КТ927В	30	75	15	50
КП904А	60	50	20	55
КТ922В	175	40	7	60
КТ931А	175	80	7	60
КТ930В	400	75	7	50

Большое число разнообразных схем ВЧ генераторов с внешним возбуждением, являются частным случаем обобщенной структурной схемы, состоящей из трех, каскадноключенных, четырехполюсников (ЧП) - входной и выходной согласующих электрических цепей и электронного прибора - транзистора или лампы рис 2.1

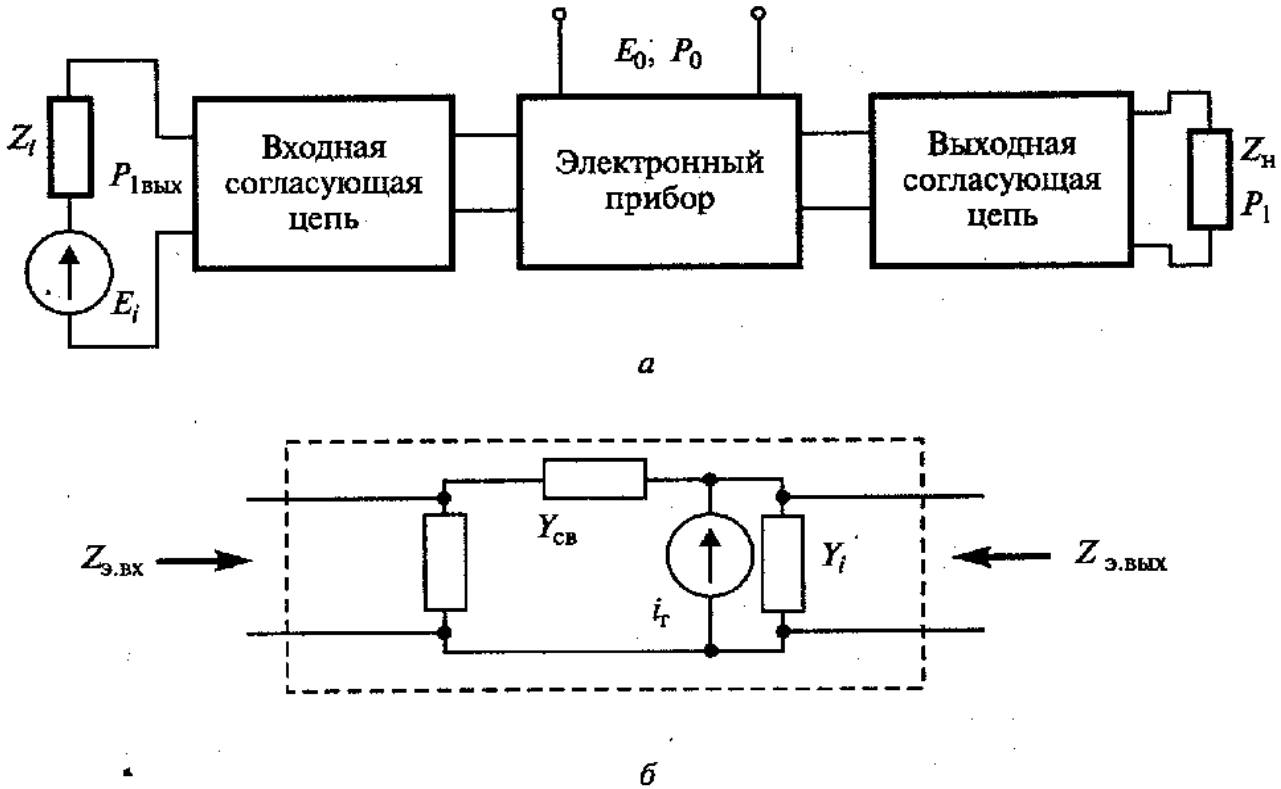


Рис. 2.1

Любой генератор отдает максимальную мощность в нагрузку при выполнении определенного условия. Из курса электротехники известно, что генератор с ЭДС $e(t) = E_i \sin(\omega t)$ и внутренним сопротивлением R_i ; при E_i и $R_i = \text{const}$ отдает в нагрузку максимальную мощность, равную $P_{г.ном.} = \frac{E_i^2}{8R_i}$ при $R_i = R_H$ рис 2.2.

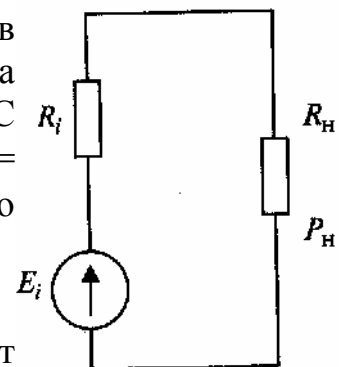


Рис. 2.2

В ВЧ генераторах оба параметра (E_i и R_i), зависящие от многих факторов, не являются постоянными величинами, и поэтому здесь условие получения максимальной мощности, передаваемой генератором в нагрузку, усложняется и вытекает из понятия «динамическая характеристика генератора по 1-й гармонике сигнала». Пусть в результате эксперимента или расчета найдены зависимости для функций напряжения $u(\omega t)$ и тока $i(\omega t)$, на выходе электронного прибора. Пример графиков таких функций на рис. 2.3 а) и б).

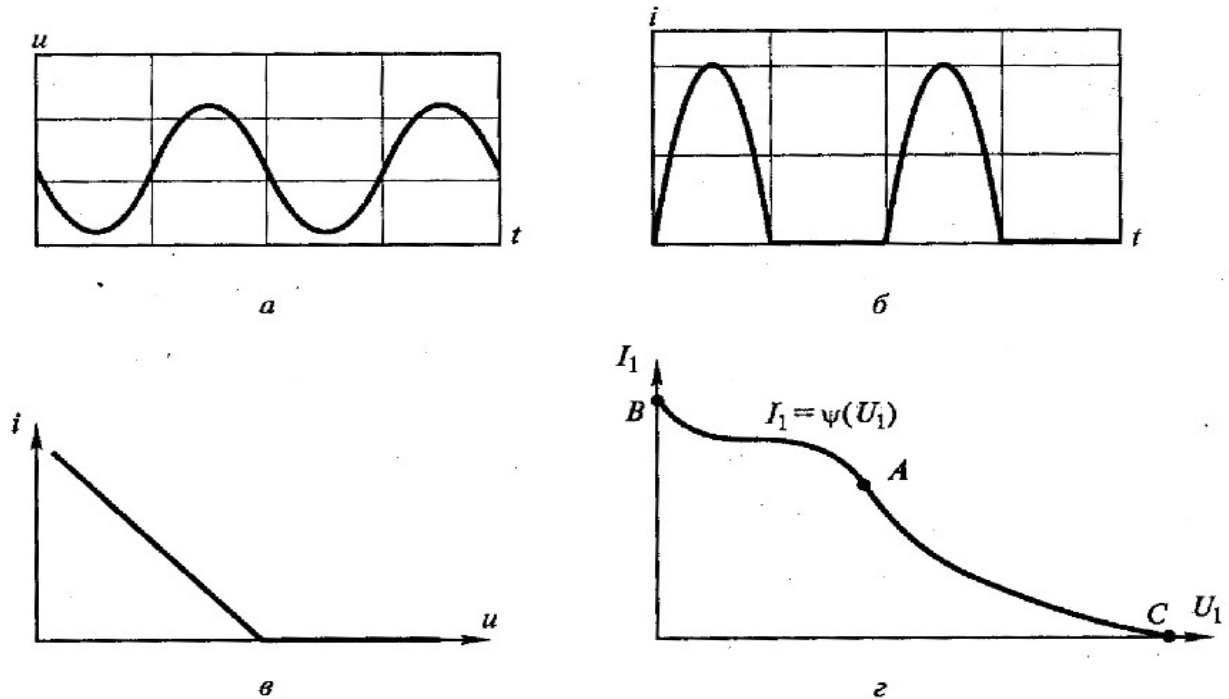


Рис. 2.3

Из двух данных зависимостей, исключив время t , можно получить третью $i=\Phi(u)$, называемую динамической характеристикой ВЧ генератора для мгновенных значений тока и напряжения рис 2.3 (в).

Разложив в ряд Фурье семейство функции напряжения $u(\omega t)$ и тока $i(\omega t)$, определим первые гармоники тока I_1 и напряжения U_1 . Зависимость $I_1 = \psi(U_1)$ называется динамической характеристикой по 1-й гармонике сигнала (рис. 2.3 г). С ее помощью определим условия передачи максимальной мощности от генератора в нагрузку. Функция $I_1 = \psi(U_1)$ является нелинейной, зависящей от частоты и мощности входного сигнала и напряжения питания. Зафиксируем данные параметры и запишем для мощности, передаваемой генератором в нагрузку:

$$P_{н1} = 0,5 I_1(U_1) \cdot U_1 \cos \varphi_{н1},$$

где $I_1(U_1)$ - динамическая характеристика ВЧ генератора по 1-й гармонике сигнала

$\varphi_{н1}$ - фазовый угол между векторами I_1 и U_1 .

Найдем частную производную функции $P_{н1} = 0,5 I_1(U_1) \cdot U_1 \cos \varphi_{н1}$ и приравняем ее к нулю для определения экстремума функции:

$$\frac{\partial P_{н1}}{\partial U_1} = \frac{1}{2} \frac{\partial I_1}{\partial U_1} U_1 \cos \varphi_{н1} + \frac{1}{2} I_1 \cos \varphi_{н1} = 0,$$

при $\varphi_{н1} = const$ получим

$$\frac{I_1}{U_1} = - \frac{\partial I_1}{\partial U_1}.$$

На графике функции $I_1 = \Phi(U_1)$ условию $\frac{I_1}{U_1} = - \frac{\partial I_1}{\partial U_1}$ передачи максимальной мощности от генератора в нагрузку соответствует точка А, режиму короткого замыкания - точка В, холостого хода - точка С. Раскроем физическое содержание выражения $\frac{I_1}{U_1} = - \frac{\partial I_1}{\partial U_1}$.

Под отношением

$$\frac{\partial I_1}{\partial U_1} = |Y_{1 \text{ диф} 1}|$$

следует понимать модуль внутренней дифференциальной проводимости по 1-й гармонике сигнала эквивалентного генератора. Ее равенство проводимости нагрузки и есть условие передачи максимальной мощности, которое можно представить в виде

$$|Y_{н1}| = |Y_{1 \text{ диф} 1}|$$

где $|Y_{н1}|$ проводимость нагрузки, подключенной к выходу электронного прибора, на частоте 1-й гармоники сигнала.

Точку А на динамической характеристике можно найти графическим путем как точку пересечения двух графиков согласно $\frac{I_1}{U_1} = - \frac{\partial I_1}{\partial U_1}$. Для этого необходимо в n-точках динамической характеристики определить значения ее координат I_1 и U_1 и производную $\frac{dI_1}{dU_1}$ как тангенс угла касательной в этой точке. Далее построим два графика:

$$\frac{I_1}{U_1} = \Phi_1(U_1); \quad \left| \frac{dI_1}{dU_1} \right| = \Phi_2(U_2)$$

Точка пересечения данных графиков определяет условия получения максимальной мощности P_1 отдаваемой ВЧ генератором в нагрузку. Чтобы убедиться в этом, следует построить график зависимости $P_1(U_1)$ рис. 2.4.

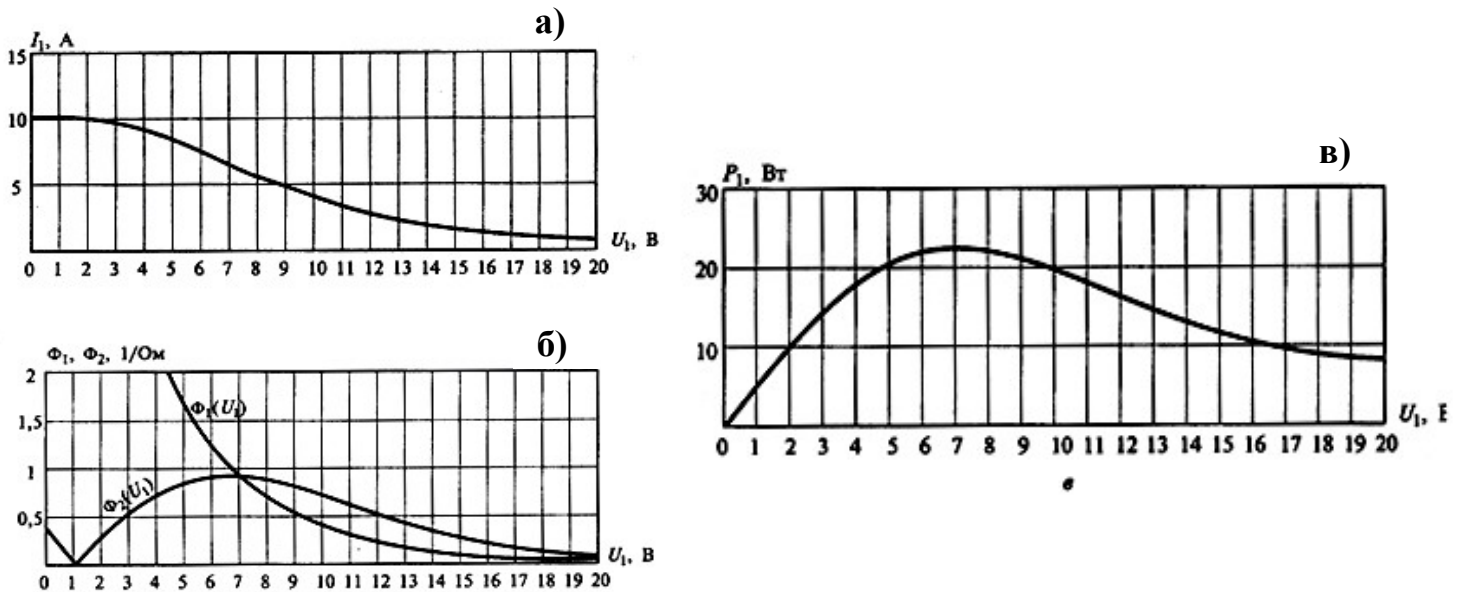


Рис. 2.4. На рисунке показаны зависимости $I_1(U_1)$ (а), $\Phi_1(U_1)$ и $\Phi_2(U_2)$ (б), $P_1(U_1)$ (в).

Нагрузочные, амплитудные и частотные характеристики ВЧ генератора.

Помимо динамической характеристики работа ВЧ генератора определяется еще тремя видами характеристик: нагрузочной, амплитудной и частотной. Нагрузочные характеристики ВЧ генератора есть зависимости его выходных электрических параметров: колебательной мощности P_1 , потребляемой P_0 и мощности рассеивания в электронном приборе P_p ; амплитуд первых гармоник тока I_1 и напряжения U_1 ; постоянной составляющей тока I_0 и КПД η от сопротивления нагрузки генератора R_1 . С их помощью можно выбрать оптимальный режим работы генератора по различным критериям (например, получению максимального КПД) и определить влияние изменения нагрузки (например, влияние входного сопротивления антенны) на выходные параметры ВЧ генератора рис 2.5.

При подаче на вход ВЧ генератора синусоидального сигнала $u_{\text{вх}}(t) = U_{\text{вх}} \sin(\omega t + \varphi_{\text{вх}})$, сигнал на его выходе или нагрузке имеет вид $u_{\text{вых}}(t) = U_{\text{вых}} \sin(\omega t + \varphi_{\text{вых}})$, т.е. отличается от входного амплитудой сигнала и фазой. Амплитудные характеристики есть зависимости амплитуды и фазы выходного сигнала от амплитуды входного сигнала рис. 2.6:

$$U_{\text{вых}} = \psi(U_{\text{вх}}); \quad \Delta \varphi_{\text{вых}} = \varphi_{\text{вых}} - \varphi_{\text{вх}} = \Phi(U_{\text{вх}})$$

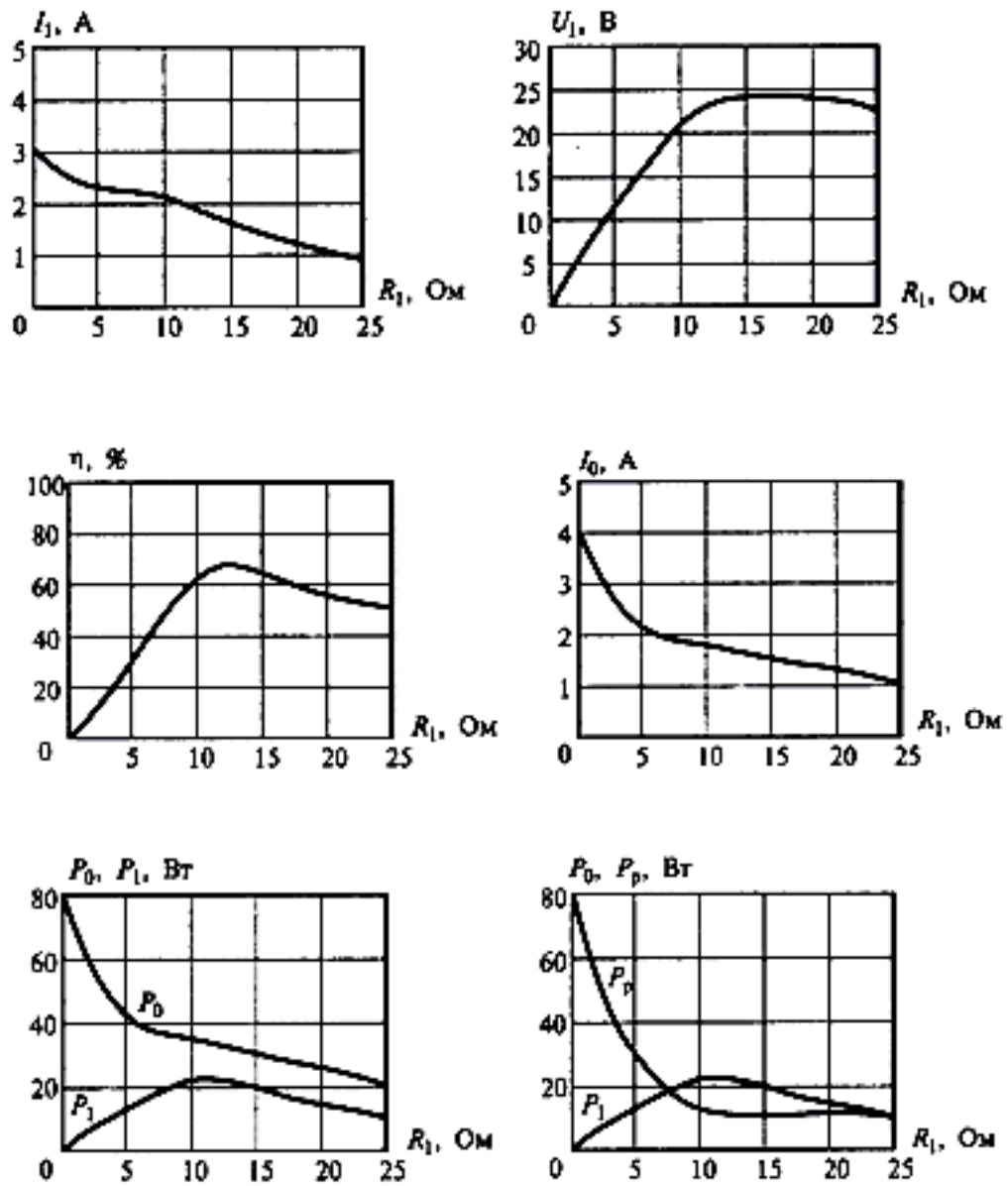


Рис. 2.5. На рисунке показаны нагрузочные характеристики ГВВ.

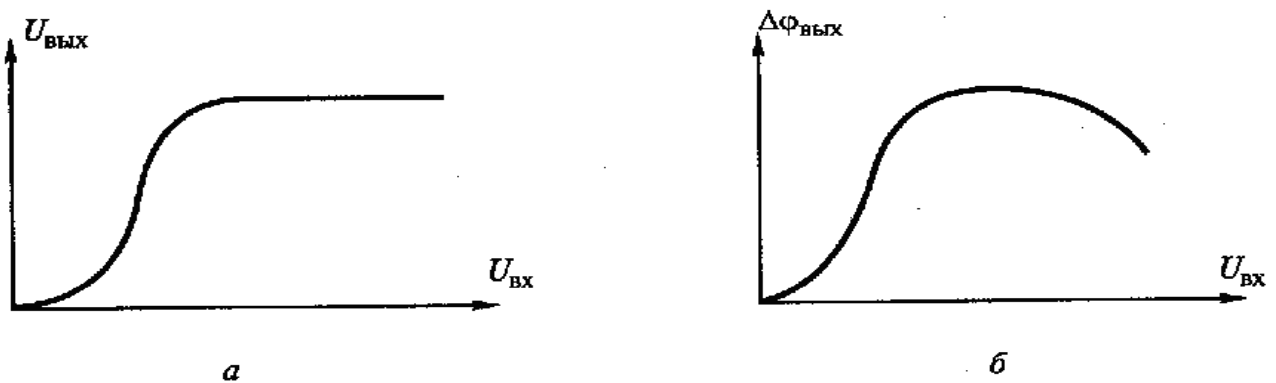


Рис. 2.6. На рисунке показаны амплитудные характеристики ГВВ.

С помощью амплитудных характеристик, определяемых в одночастотном режиме работы, можно, например, рассчитать выходной комбинационный спектр при многочастотном входном сигнале. Частотные характеристики есть зависимости номинального коэффициента усиления по мощности ВЧ генератора $K_{P \text{ ном}}$ и фазы выходного сигнала $\varphi_{\text{вых}}$ от частоты входного сигнала:

$$K_{P \text{ ном}} = \psi(f); \quad \Delta \varphi_{\text{вых}} = \varphi_{\text{вых}} - \varphi_{\text{вх}} = \Phi(f)$$

Данные характеристики определяют частотные свойства ВЧ генератора рис. 2.7.

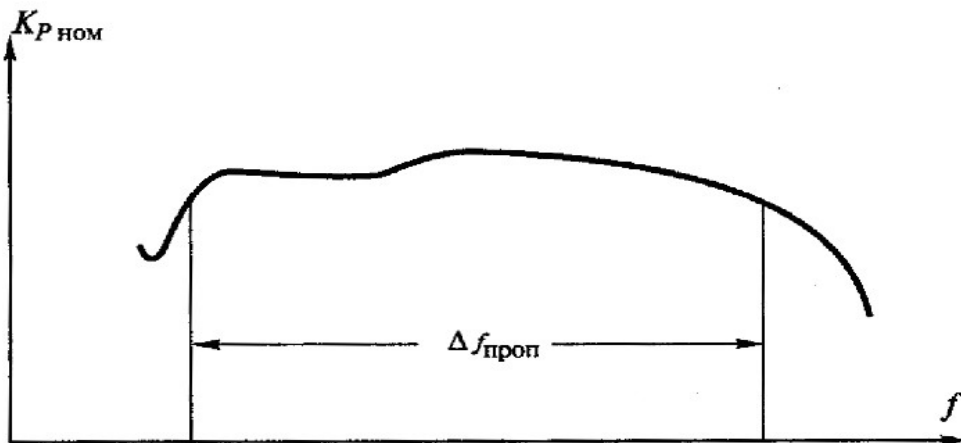


Рис. 2.7. На рисунке показана типичная частотная характеристика ГВВ.

С помощью данной характеристики, построенной в одночастотном режиме работы, можно определить прохождение через усилитель широкополосных сигналов, а также использование ВЧ генератора в диапазонных радиопередатчиках без перестройки электрических согласующих цепей.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ.

Приборы и оборудование.

Исследование транзисторного ВЧ усилителя мощности (ГВВ) проводится на учебной лабораторной установке УгиФС-1 «ГЕНЕРАТОР С ВНЕШНИМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ», принципиальная электрическая схема которой приведена на рис. 3.1.

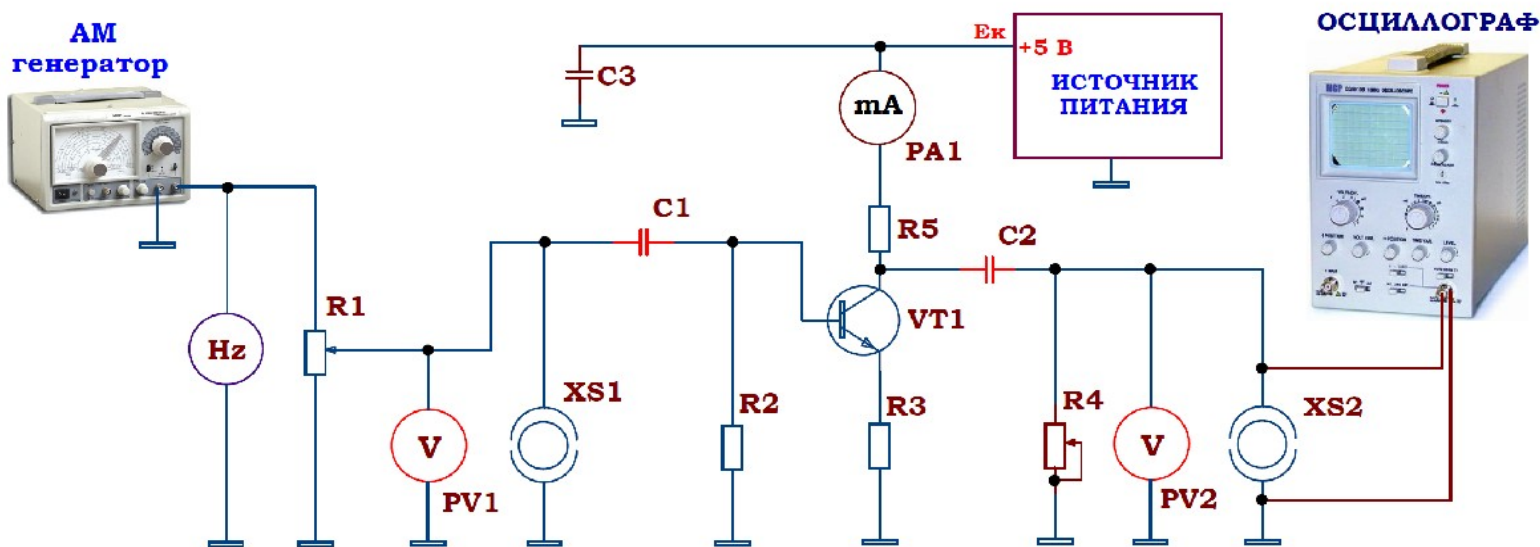


Рис. 3.1. Принципиальная электрическая схема учебной установки УгиФС-1 для исследования транзисторного генератора с внешним возбуждением.

Установка предназначена для проведения лабораторных работ по курсу «Радиотехника и электроника» в высших и средне-технических учебных заведениях.

Установка может быть использована в различных курсах, изучающих основы электронной техники в высших и средних специальных учебных заведениях.

Установка выполнена в климатическом исполнении УХЛ, категория 4.2 ГОСТ 15150-69 для эксплуатации в помещении при температуре от 10°C до 35°C и относительной влажности до 80 %.

Учебная установка конструктивно состоит из нескольких элементов, конструктивно объединенных в одном корпусе:

- набора изучаемых элементов и устройств;
- стабилизированного источника питания, подающего питание нужной полярности и значения на все элементы схемы;
- схемы контроля необходимых параметров, осуществляющей информацию о ходе эксперимента и вывод на экран LCD дисплея.

Напряжение питания со стабилизированного источника питания ($E_k = +30$ Вольт для опытов 1 — 3 и $E_k = +5$ Вольт для опыта 4) подаётся на встроенный АМ генератор и транзисторный генератор с внешним возбуждением (ВЧ усилитель мощности) через миллиамперметр PA1.

Электронный осциллограф измерительным щупом типа «BNC — ТЮЛЬПАН» подключается ко входу ГВВ (клемма XS1) либо к выходу ГВВ (клемма XS2) для наблюдения за формой сигналов соответственно на входе и на выходе ГВВ. Вывод BNC измерительного щупа подключается ко входу Y электронного осциллографа.

Амплитудно — модулированный сигнал с выхода АМ-генератора подаётся на базу транзистора VT1. С коллектора VT1 через разделительный конденсатор C2 преобразованный сигнал подаётся на регулируемую активную нагрузку R4 и на вход Y электронного осциллографа (клемма XS2).

Режим работы учебной установки выбирается с помощью кнопок управления «УПРАВЛЕНИЕ - +» и многофункциональной ручки «ГВВ». При этом в зависимости от выбранного эксперимента в схему подключаются нужные элементы (вольтметры, миллиамперметр, частотомер, АМ — генератор).

Все установленные значения отображаются в интерактивном меню с помощью цифрового LCD ЖКД индикатора. Для начала эксперимента (включение генератора и подключения необходимых измерительных приборов) необходимо нажать кнопку «ВХОД». Для завершения эксперимента необходимо нажать кнопку «ВЫХОД».

1. **Режим работы «MODE N1». «Исследования зависимости режима работы и энергетических характеристик ГВВ от величины напряжения возбуждения».** В данном режиме работы на вход ГВВ с АМ генератора подаётся регулируемое ручкой R1 «ГВВ» напряжение возбуждения $U_{\text{возб}}$, измеряемое вольтметром PV1. Коллекторный ток измеряется миллиамперметром PA1, сопротивление нагрузки в данном опыте R4 автоматически устанавливается постоянным $R4 = \text{const} = 75 \text{ Ом}$. Напряжение на нагрузке R4 измеряется вольтметром PV2. Гнезда XS1 и XS2 отключены, сигнал на них не подаётся из — за возможных погрешностей и нестабильностей измерений, вызванных наводками в соединительных проводах.

2. **Режим работы «MODE N2». «Исследования зависимости режима работы и энергетических характеристик ГВВ от величины сопротивления нагрузки».** В данном режиме работы снимаются нагрузочные характеристики ВЧ усилителя. При этом с АМ генератора на вход ГВВ подаётся фиксированное значение напряжения возбуждения $U_{\text{возб}} = 1,9 \text{ В}$. Для регулировки сопротивления нагрузки R_n в данном опыте служит многофункциональная ручка управления «ГВВ». Ток коллектора транзистора VT1 измеряется миллиамперметром PA1, напряжение на нагрузке — вольтметром PV2, сопротивление нагрузки встроенным омметром. Все измеренные параметры выводятся на ЖКД LCD индикатор. Гнезда XS1 и XS2 отключены, сигнал на них не подаётся из — за возможных погрешностей и нестабильностей измерений, вызванных наводками в соединительных проводах.

3. **Режим работы «MODE N3». «Исследования частотной**

характеристики ГВВ». В данном режиме работы на вход ГВВ с АМ генератора подаётся напряжение возбуждения фиксированной амплитуды $U_{\text{возб}}=1,9$ В и регулируемой многофункциональной ручкой «ГВВ» частотой. Частота несущей генератора АМ измеряется встроенным частотомером, амплитуда сигнала на выходе нагрузки — вольтметром PV2. Гнезда XS1 и XS2 отключены, сигнал на них не подаётся из — за возможных погрешностей и нестабильностей измерений, вызванных наводками в соединительных проводах.

4. Режим работы «MODE N4». «Исследования сигналов ГВВ в режиме реального времени с помощью электронного осциллографа». Сигналы со входа XS1 и выхода XS2 ГВВ подаются на соответствующие выведенные клеммы учебной установки. Амплитуда входного АМ сигнала регулируется ручкой «ГВВ». Все измерения проводятся с помощью электронного осциллографа.

Методика измерений.

Генератор с внешним возбуждением (усилитель мощности) является важнейшим звеном подавляющего большинства радиопередающих устройств. Основными требованиями к усилителю мощности являются: заданный уровень выходной мощности и высокий коэффициент полезного действия. Это обеспечивается выбором режима колебаний 2-го рода (с отсечкой коллекторного тока) в сочетании с критическим или несколько перенапряженным режимом. При этом амплитуда переменного напряжения на коллекторе близка к напряжению питания.

В течение периода колебаний транзистор переходит из одного режима в другой, например, из активной области в область отсечки и далее снова в активную (недонапряженный режим) или из активной области в область насыщения, далее в активную, в область с отсечкой и снова в активную область (перенапряженный режим). При этом эмиттерный переход открывается лишь на часть периода колебаний высокой частоты, и ток коллектора представляет собой импульсный сигнал. Эта часть периода называется углом проводимости $\tau_{пр}$ и измеряется в градусах. При симметричных импульсах коллекторного тока используется понятие отсечки тока θ , при этом:

$$\theta = \frac{\tau_{пр}}{2} \quad (3.1)$$

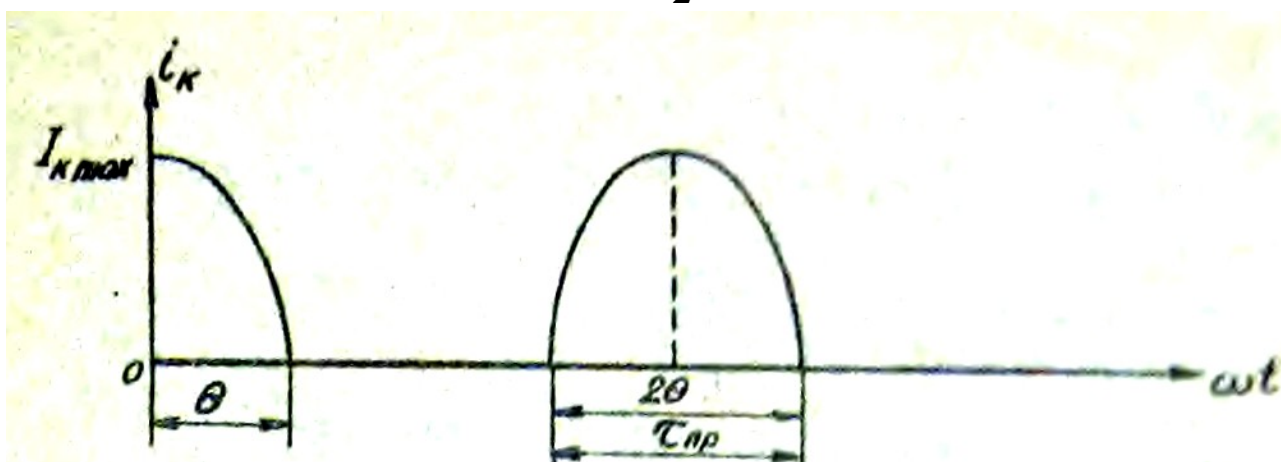


Рис. 3.2. Осциллограммы импульсов коллекторного тока при подачи на вход ГВВ гармонического сигнала $u = u_0 \sin(\omega t)$

Косинусоидальные импульсы коллекторного тока содержат постоянную составляющую I_{k0} , первую гармонику с амплитудой I_{k1} и ряд более высоких гармонических составляющих I_{kn} :

$$i_k(t) = I_{k0} + I_{k1} \cos(\omega t) + \sum_{n=2}^{\infty} I_{kn} \cos(n\omega t) \quad (3.2)$$

Выходная согласующая цепь каскада настраивается на частоту первой гармоники коллекторного тока и обеспечивает согласование требуемого эквивалентного сопротивления нагрузки $R_{э}$ для транзисторного ГВВ, при

котором обеспечивается критический режим его работы, с реальным сопротивлением нагрузки.

Постоянная составляющая коллекторного тока I_{k0} и амплитуда первой гармоники I_{k1} определяются амплитудой импульса коллекторного тока $I_{k \text{ MAX}}$ и углом отсечки θ (3.1):

$$I_{k0} = I_{k \text{ max}} \alpha_0(\theta), \quad I_{k1} = I_{k \text{ max}} \alpha_1(\theta) \quad (3.3)$$

Полезная колебательная мощность P_1 , отдаваемая транзистором:

$$P_1 = \frac{1}{2} I_{k1}^2 R_{\text{Э}} = \frac{1}{2} \frac{U_k^2}{R_{\text{Э}}} = \frac{1}{2} I_{k1} U_k; \quad U_k = \xi E_k \quad (3.4)$$

или с учетом (3.3):

$$P_1 = \frac{1}{2} I_{k0} E_k \frac{\alpha_1(\theta)}{\alpha_0(\theta)} \xi \quad (3.4a)$$

где $U_k = I_{k1} R_{\text{Э}}$ — амплитуда переменного напряжения на коллекторе.

Амплитуда переменного напряжения на коллекторе составляет часть постоянного коллекторного напряжения $\xi = \frac{U_k}{E_k}$. Величину ξ называют коэффициентом использования коллекторного напряжения.

Для критического режима обычно $\xi_{\text{кр}} = 0,9 — 0,95$.

Мощность, потребляемая каскадом от источника питания P_0 , определяется выражением:

$$P_0 = I_{k0} E_k \quad (3.5)$$

А мощность, рассеиваемая на коллекторе:

$$P_k = P_0 - P_1 \quad (3.6)$$

Таким образом, можно ввести коэффициент полезного действия коллекторной цепи, как отношение полезной мощности к полной потреблённой мощности:

$$\eta = \frac{P_1}{P_0} \quad (3.7)$$

Мощность, выделяемую на нагрузке можно рассчитать по формуле:

$$P_{1н} = \frac{U_n^2}{R_n} \quad (3.8)$$

Она связана с полезной колебательной мощностью соотношением:

$$P_1 = \frac{P_{1H}}{\eta_\phi} \quad (3.9)$$

где η_ϕ — коэффициент передачи фильтра, определяющий потери в фильтре. В данной конструкции фильтр не используется и можно считать $\eta_\phi \approx 1$. Таким образом для данной учебной модели ГВВ можно считать:

$$P_{1H} \approx P_1 \quad (3.10)$$

Порядок выполнения.

1. Перед включением установки в сеть необходимо убедиться в целостности сетевых и соединительных проводов. Все соединительные провода и контрольные точки использовать следует только по назначению, запрещается замыкать выход нагрузки и выходы контрольных точек.
2. Включить установку и электронный осциллограф в сеть ~ 220 В с помощью прилагаемого силового сетевого кабеля евро-стандарта. Поставить переключатель «СЕТЬ» на панели учебного модуля и осциллографа в положение «ВКЛ», при этом должен загореться сигнальный индикатор «СЕТЬ».
3. С помощью кнопок «УПРАВЛЕНИЕ - +» выбрать первый эксперимент «mode N1».
4. Запустить эксперимент нажатием кнопки «ВХОД» и приступить к снятию амплитудных характеристик ГВВ.
5. Подавая на вход ГВВ с АМ генератора напряжение возбуждения U_{vozb} , регулируемое ручкой R1 «ГВВ» и измеряемое вольтметром PV1, снять амплитудные характеристики транзисторного ГВВ: 1) зависимость напряжения на нагрузке U_n от напряжения возбуждения — $U_n = U_{НАГР} = U_n(U_{vozb})$; 2) зависимость тока $I = I_{k0}$ от напряжения возбуждения — $I = I_{k0} = I_{k0}(U_{vozb})$. Коллекторный ток I_{k0} измеряется миллиамперметром PA1, сопротивление нагрузки в данном опыте R4 автоматически устанавливается постоянным $R4 = \text{const} = 75$ Ом. Напряжение на нагрузке R4 U_n измеряется вольтметром PV2.
6. Рассчитать по формуле (3.8) мощность P_{1H} , выделяемую на нагрузке. Для данной учебной модели ГВВ можно считать, что мощность выделяемая на нагрузке практически равна колебательной мощности $P_{1H} \approx P_1$.
7. По формуле (3.5) рассчитать мощность, потребляемую каскадом от источника питания P_0 , а по формуле (3.6) мощность P_k , рассеиваемую на коллекторе. В данном режиме при расчетах полагать, что напряжение питания составляет $E_k = 30$ Вольт.
8. Оценить по формуле (3.7) коэффициент полезного действия коллекторной цепи η . Занести все измеренные и расчётные данные в таблицу 3.1:

Таблица 3.1

$U_{vozb} = U_{ВОЗБ}, В$	$I = I_{k0}, мА$	$U_n = U_{нагр}, В$	$P_{1H} \approx P_1, Вт$	$P_0, Вт$	$P_k, Вт$	$\eta = \frac{P_1}{P_0} \cdot 100\%$

9. На миллиметровой бумаге построить графики зависимостей (амплитудные характеристики) $U_{НАГР} = U_n(U_{vozb})$; $I_{k0} = I_{k0}(U_{vozb})$, $P_{1H} \approx P_1(U_{vozb})$, $P_0 \approx P_0(U_{vozb})$, $P_k \approx P_k(U_{vozb})$, $\eta = \eta(U_{vozb})$.

10. Сравнить полученные результаты с теоретическими данными на рис. 2.6. С увеличением напряжения возбуждения $U_{\text{возб}}$ происходит относительно равномерное увеличение тока коллектора I_{k0} , напряжения на нагрузке $U_n = U_{\text{нагр}}$, КПД η и значений всех исследуемых мощностей, кроме мощности P_k , рассеиваемой на коллекторе, которая увеличивается лишь до определенного значения, а затем начинает медленно и неровно снижаться.

11. Остановить эксперимент нажатием кнопки «ВЫХОД».

12. С помощью кнопок «УПРАВЛЕНИЕ - +» выбрать второй эксперимент «mode N2».

13. Запустить эксперимент нажатием кнопки «ВХОД» и приступить к снятию нагрузочных характеристик ГВВ.

14. Снять нагрузочные характеристики ВЧ усилителя, т. е. зависимости коллекторного тока I_{k0} и напряжения на нагрузке $U_{\text{нагр}}$ ГВВ от сопротивления нагрузки. Для этого вращая ручку регулировки сопротивления нагрузки R_n (в данном опыте служит многофункциональная ручка управления «ГВВ»), записывать показания тока коллектора I_{k0} , напряжения на нагрузке U_n и значение сопротивления нагрузки R_n в таблицу 3.2. В данном режиме с АМ генератора на вход ГВВ подаётся фиксированное значение напряжения возбуждения $U_{\text{возб}} = 1,9 \text{ В}$.

Таблица 3.2

$R_n = R_{\text{нагр}}, \text{ Ом}$	$I = I_{k0}, \text{ mA}$	$U_n = U_{\text{нагр}}, \text{ В}$	$P_{1н} \approx P_1, \text{ Вт}$

15. Для каждого установленного сопротивления нагрузки R_n рассчитать по формуле (3.8) мощность, выделяемую на нагрузке.

16. На миллиметровой бумаге построить графики зависимостей (нагрузочные характеристики) $U_{\text{нагр}} = U_n(R_n)$; $I_{k0} = I_{k0}(R_n)$, $P_{1н} \approx P_1(R_n)$ и сравнить вид полученных зависимостей с теоретическими данными рис. 2.5. Правильно рассчитать и оценить КПД и другие энергетические параметры в данном режиме затруднительно из-за достаточно сильной нелинейной зависимости коэффициента использования коллекторного напряжения ξ от сопротивления нагрузки $\xi = \xi(R_n)$.

17. Остановить эксперимент нажатием кнопки «ВЫХОД».

18. С помощью кнопок «УПРАВЛЕНИЕ - +» выбрать третий эксперимент «mode N3».

19. Запустить эксперимент нажатием кнопки «ВХОД» и приступить к снятию частотных характеристик ГВВ.

20. Снять частотную характеристику ГВВ. В данном режиме работы на вход ГВВ с АМ генератора подаётся напряжение возбуждения фиксированной

амплитуды $U_{\text{взб}}=1,9 \text{ В}$ и регулируемой многофункциональной ручкой «ГВВ» частотой.

21. Вращая ручку «ГВВ» и записывая показания частотомера f [kHz] и вольтметра PV2, измеряющего напряжение на нагрузке U_n , записать полученные результаты в таблицу 3.3.

Таблица 3.3

Частота f , кГц	$U_n=U_{\text{нагр}}$, В

22. На миллиметровой бумаге построить график зависимости напряжения на нагрузке от частоты подаваемого на вход сигнала $U_{\text{нагр}}=U_n(f)$ (частотная характеристика) и сравнить вид полученной зависимости с теоретическими данными рис. 2.7.

23. Остановить эксперимент нажатием кнопки «ВЫХОД».

24. С помощью кнопок «УПРАВЛЕНИЕ - +» выбрать четвертый эксперимент «mode N4».

25. Запустить эксперимент нажатием кнопки «ВХОД» и приступить к наблюдению сигналов в режиме реального времени на входе и выходе генератора с внешним возбуждением.

26. Для этого подключить вход Y электронного осциллографа с помощью кабеля «BNC – ТЮЛЬПАН» к клемме XS1 схемы.

27. Вращением ручек VOLTS/DIV и TIME/DIV (ВОЛЬТ/ДЕЛ и ВРЕМЯ/ДЕЛ) и ручек POSITION осей X и Y на электронном осциллографе добиться визуально наиболее удобного изображения сигнала. Для дополнительной синхронизации можно использовать ручку LEVEL. Ручка «Y-LINE-EXT» метода синхронизации должна находиться в положении Y (внутренняя синхронизация). При этом следует учитывать, что оси X (время) и Y (амплитуда) откалиброваны правильно (т. е. подписи у ручек VOLTS/DIV и TIME/DIV верны) только при повернутых до упора ручках плавной регулировки VOLT VAR. и TIME VAR.

28. Установить амплитуду входного АМ сигнала ручкой «ГВВ» в максимальное значение, повернув ручку до упора по часовой стрелке.

29. Наблюдать АМ сигнал на экране электронного осциллографа. Сигнал должен иметь вид аналогичный рис. 3.3.

30. Перерисовать сигнал с экрана электронного осциллографа по

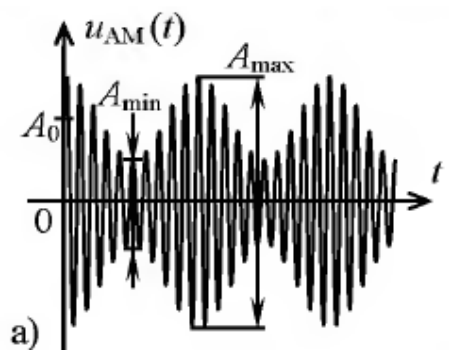


Рис. 3.3. Осциллограммы АМ сигнала на входе ГВВ (клемме XS1)

клеткам на миллиметровую бумагу.

31. Определить максимальную A_{max} и минимальную A_{min} амплитуды сигнала, частоту несущей и частоту низкочастотной огибающей, а также их периоды.

32. По формуле $m = \frac{A_{max} - A_{min}}{A_{max} + A_{min}}$ оценить глубину (коэффициент) модуляции m .

33. Подключить вход Y электронного осциллографа с помощью кабеля «BNC – ТЮЛЬПАН» к клемме XS2 схемы (выходу ГВВ) и наблюдать «урезанный» сигнал с коллектора транзистора VT1, аналогичный сигналу рис 3.4.

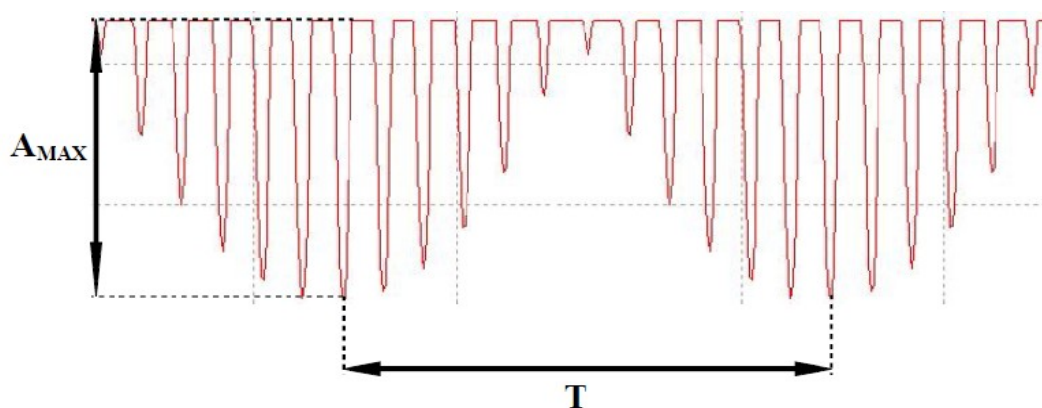


Рис. 3.4. Осциллограммы сигнала на выходе ГВВ (клемме XS2)

34. Определить максимальную A_{max} и минимальную A_{min} амплитуды сигнала, частоту несущей и частоту низкочастотной огибающей, а также их периоды.

35. Оценить усиление сигнала как отношение размаха сигнала на выходе к размаху сигнала на входе ГВВ: $K = \frac{A_{max \text{ Вых}}}{A_{max \text{ Вх}}}$

36. Повторить опыт 4 «MODE 4» для других 2 — 4 значений амплитуды входного сигнала.

37. По окончании работы поставить переключатель «СЕТЬ» на панели установки и осциллографа в положение «выкл», при этом должен погаснуть индикатор сеть и вынуть сетевые вилки из розеток.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

1. Пользуясь упрощенной принципиальной электрической схемой на лицевой панели стенда, показать, по каким цепям протекают переменные и постоянные составляющие токов транзистора.
2. Объяснить назначение блокировочных и разделительных элементов в схеме ГВВ и сформулировать рекомендации по выбору их номиналов.
3. Объяснить уравнения баланса мощностей в коллекторной цепи ГВВ.
4. Дать определение граничного, недонапряженного и перенапряженного режимов работы и провести их сравнительный анализ.
5. Объяснить ход нагрузочных, амплитудных и частотных характеристик ГВВ.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА.

1. «Устройства генерирования и формирования радиосигналов» под ред. Г.М.Уткина.- М.: «Радио и связь», 1994.
2. Петров Б.Е., Романюк В.А. Радиопередающие устройства на полупроводниковых приборах. - М.: «Высшая школа».-1989.
3. «Радиопередающие устройства» под ред. М.В.Благовещенского, Г.В.Уткина.- М., «Радио и связь», 1982.
4. «Радиопередающие устройства», В.В. Шахгильдян и др.; Под ред. В.В.Шахгильдяна. - М.: «Радио и связь», 2003.

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