

## ЧЕТЫРЕ ЛЕКЦИОННЫЕ ДЕМОСТРАЦИИ ПО КУРСАМ ТЕОРИИ КОЛЕБАНИЙ И РАДИОТЕХНИКИ

### 1. СОБСТВЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ В РЕГЕНЕРИРОВАННОМ КОЛЕБАТЕЛЬНОМ КОНТУРЕ.

#### ПРОЦЕСС УСТАНОВЛЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ В $LC$ -ГЕНЕРАТОРЕ ПОЧТИ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Демонстрацию колебательных процессов в регенерированном контуре и  $LC$ -генераторе удобно производить, применяя в качестве активного элемента системы полупроводниковый триод по следующим причинам: 1) вследствие большого различия в величинах входного ( $\sim 10^2$  ом) и выходного ( $\sim 10^6$  ом) сопротивлений полупроводникового триода для выполнения условия самовозбуждения в генераторе с трансформаторной связью катушка обратной связи должна состоять всего лишь из нескольких витков и ее легко наматывать непосредственно при демонстрации; 2) источники питания полупроводникового триода низковольтны и экспериментировать с таким генератором в лекционных условиях совершенно безопасно.

Предлагаемая экспериментальная установка позволяет демонстрировать большой аудитории следующие явления:

1. Собственные затухающие колебания в  $LC$ -контуре и зависимость их формы от декремента контура.

2. Увеличение затухания собственных колебаний в контуре при наличии отрицательной обратной связи.

3. Уменьшение затухания собственных колебаний в регенерированном контуре при положительной обратной связи ниже критической.

4. Процесс установления колебаний генератора почти-гармонических колебаний при различной величине положительной обратной связи и разных начальных условиях.

Установка позволяет наблюдать форму стационарных автоколебаний в контуре и вне контура генератора. Во всех перечисленных случаях может быть получен фазовый портрет соответствующего процесса.

Экспериментальная установка, схема которой изображена на рис. 1, состоит из собранного на открытой панели  $LC$ -генератора на полупроводниковом триоде, размещенного на этой же панели реле, демонстрационного осциллографа и выпрямителя. В генераторе почти-гармонических колебаний используется низкочастотный маломощный полупроводниковый триод, например типа П-14. Напряжение коллектор-база  $U_k$  регулировать не требуется. Оно выбирается равным примерно  $10$  в. Напряжение эмиттер — база  $U_э$  должно регулироваться в пределах  $0-30$  в. К точкам  $a$  —  $b$

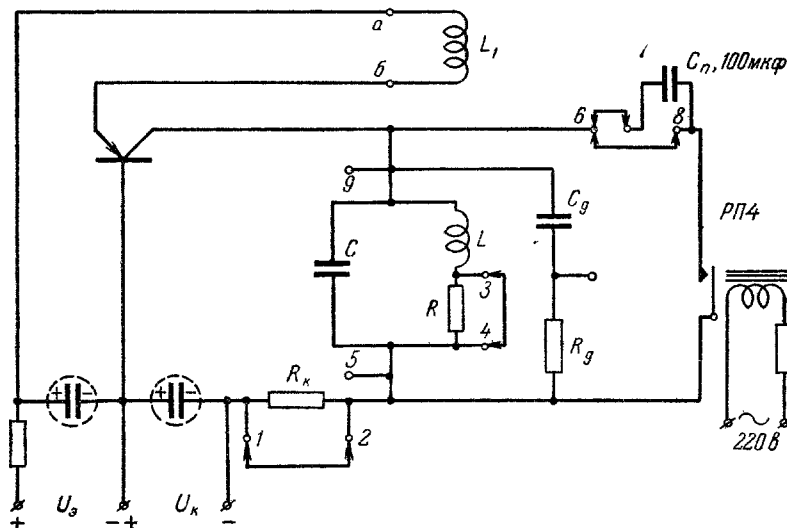


Рис. 1.

в эмиттерной цепи триода подключен гибкий изолированный провод длиной около  $2$  м. Этот провод, называемый ниже проводом  $ab$ , при демонстрации опыта навивается лектором на катушку контура  $L$ , что соответствует включению в схему катушки обратной связи  $L_1$ . В зависимости от направления намотки обратная связь может быть сделана положительной либо отрицательной. Цепь  $R_g C_g$  является простейшей дифференцирующей цепочкой и служит для получения производной от напряжения на конденсаторе, что необходимо при наблюдении осциллограммы фазового портрета демонстрируемого процесса. Реле типа РП-4 периодически закорачивает контур генератора при демонстрации процессов установления или затухания колебаний. О назначении конденсатора  $C_n$  будет сказано ниже.

**Порядок демонстрации опытов.** 1. Собственные затухающие колебания в  $LC$ -контуре. Провод  $ab$  на катушку  $L$  не навивается. Сопротивление  $R_k$  и емкость  $C_n$  закорачиваются перемычками. Осциллограф подключается к зажимам 5—9. Синхронизация осциллографа производится напряжением сети питания. При работе реле РП-4 на экране осциллографа наблюдается процесс затухающих колебаний в контуре, возникающий по следующей причине. После размыкания контактов в реле происходит быстрый заряд конденсатора  $C$  до некоторого напряжения, величину которого можно регулировать, изменяя напряжение  $U_э$ . Этот начальный бросок напряжения на конденсаторе обусловлен тем, что постоянная времени цепи заряда конденсатора выбрана много меньше периода собственных колебаний  $LC$ -контура. При включении в контур генератора сопротивления  $R$  (путем снятия перемычки 3—4) затухание собственных колебаний происходит значительно быстрее. Для демонстрации фазового портрета затухающих колебаний, а также и всех прочих процессов, описание которых — ниже, следует отключить развертку осциллографа и на вторую пару его пластин подать напряжение с сопротивления  $R_g$ .

После показа собственных затухающих колебаний свободного контура в схему вводится отрицательная обратная связь, для чего на катушку  $L$  навивается провод в соответствующем отрицательной обратной связи направлении, на что следует особо

обратить внимание аудитории. При достаточно большом числе витков катушки обратной связи процесс в контуре становится аperiodическим.

Затем направление намотки провода *ab* меняется на противоположное, что соответствует положительной обратной связи. Показывается, что регенерированный

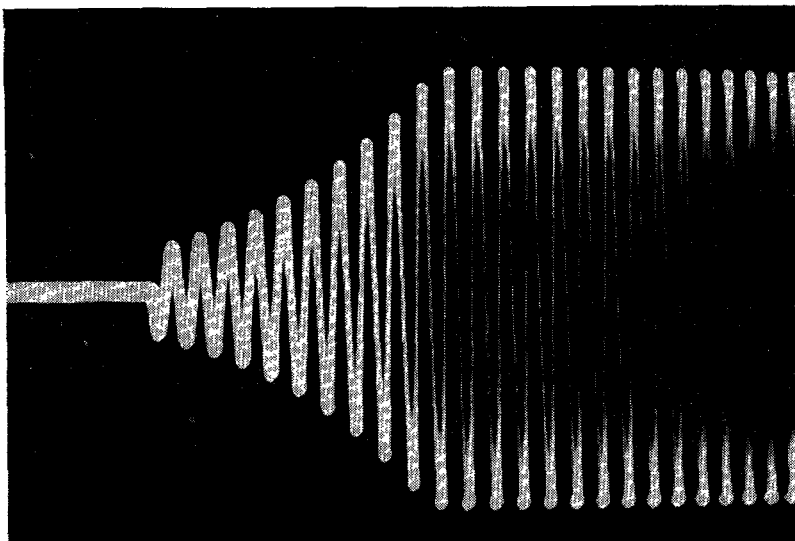


Рис. 2

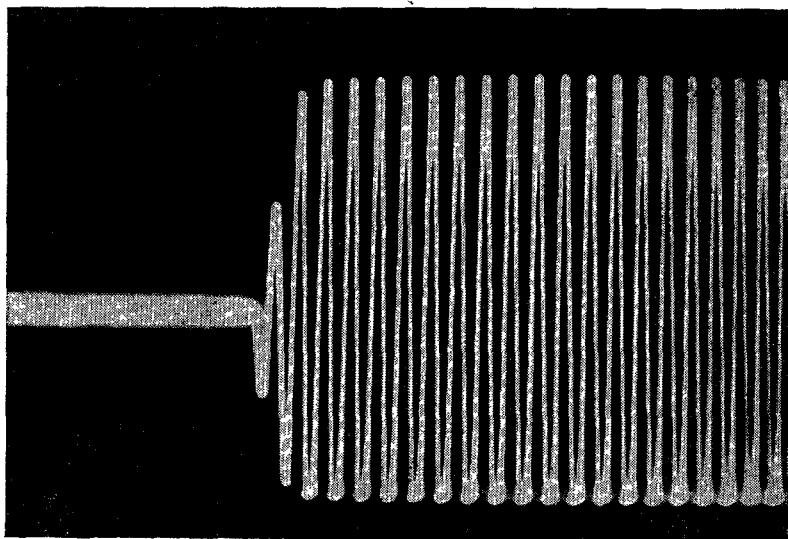


Рис. 3.

контур обладает тем меньшим затуханием, что больше положительная обратная связь. При критической обратной связи затухание контура компенсируется полностью и на экране осциллографа можно наблюдать отрезок синусоиды. При этом следует подчеркнуть, что точная компенсация затухания контура практически невыполнима вследствие флуктуации параметров системы (например, коэффициента усиления по напряжению полупроводникового триода). Устойчивость наблюдаемой в эксперименте картины объясняется лишь тем, что время наблюдения ограничено, что позволяет видеть только начальную стадию многократно повторяющихся процессов.

2. Процесс установления колебаний в генераторе почти-гармонических колебаний. Дифференциальное уравнение примененного в установке генератора на полупроводниковом триоде с параллельным контуром в цепи коллектора по структуре аналогично уравнению лампового генератора с колебательным контуром в цепи анода. Сославшись на эту аналогию, лектор может выводить уравнение для лампового генератора. Вывод уравнения генератора на полупроводниковом триоде в схеме рис. 1 дан в работе<sup>1</sup>.

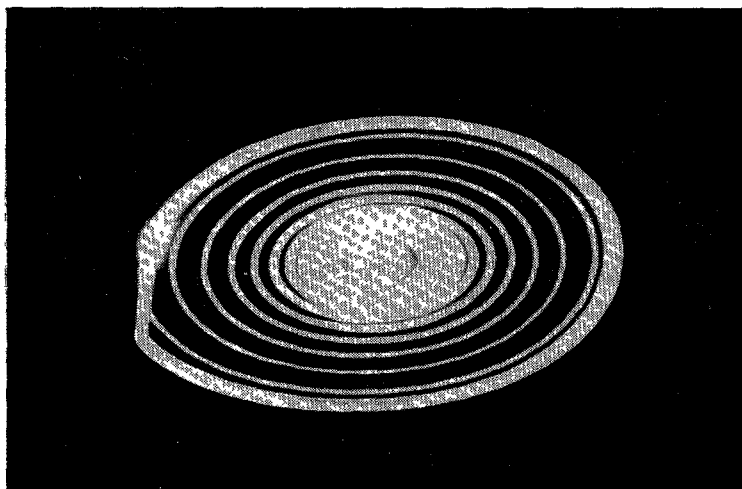


Рис. 4.

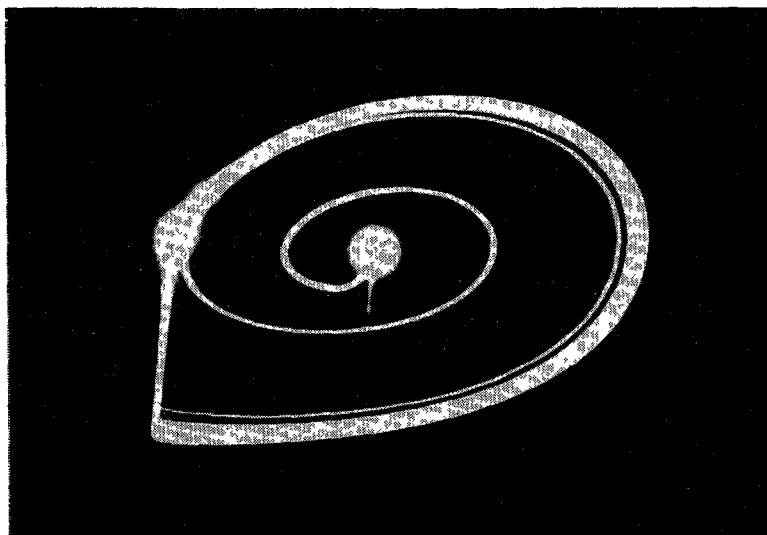


Рис. 5.

Для демонстрации процесса установления колебаний в генераторе с фиксированного начального уровня емкость  $C_n$ , так же как и при демонстрации собственных колебаний контура, должна быть замкнута перемычкой. Регулируя величину положительной обратной связи, можно изменять длительность процесса установления колебаний генератора. Наблюдаемые при этом осциллограммы при сильной и слабой регенерации системы показаны соответственно на рис. 2 и 3. Соответствующие этим процессам фазовые портреты, наблюдающиеся на экране осциллографа, представлены на рис. 4 и 5.

Для демонстрации процесса установления колебаний при случайном значении начального напряжения на конденсаторе контура  $C$  в схему следует включить конденсатор  $C_n$ , сняв перемычку 6—8 и включив ее в гнезда 6—7. Постоянная времени заряда конденсатора  $C_n$  выбрана настолько большой, что напряжение на  $C_n$  всегда примерно равно начальному напряжению на конденсаторе  $C$  в момент размыкания контактов реле. В этом случае постоянна начальная фаза, но флуктуирует начальная амплитуда, что хорошо видно на экране осциллографа.

3. Стационарные автоколебания генератора. Для демонстрации формы стационарных автоколебаний генератора реле следует выключить. Так как контакты реле после его выключения могут оказаться замкнутыми, следует снять перемычки 6—8 и 6—7. Установка позволяет наблюдать форму колебаний напряжения на конденсаторе контура  $C$ . Даже при сильной регенерации она остается близкой к синусоидальной. Затем следует показать форму автоколебаний тока коллектора триода, сняв перемычку 1—2 и подключив осциллограф к сопротивлению  $R_k$ . Форма этого тока близка к гармонической только при обратной связи, лишь незначительно превышающей критическую. При сильной регенерации форма коллекторного тока далека от гармонической, в то время как колебания в контуре близки к гармоническим. Таким образом, демонстрируется одно из основных свойств автоколебательных систем, содержащих добротные резонансные системы.

## II. АНАЛИЗ СПЕКТРА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Целью эксперимента является показать действие параллельного  $LC$ -контура как простейшего анализатора спектра электрических колебаний.

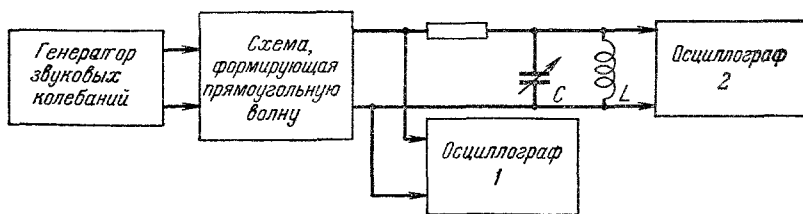


Рис. 6.

Блок-схема экспериментальной установки дана на рис. 6. Специальная приставка к типовому звуковому генератору (например, типа ЗГ-10) позволяет получать колебания напряжения прямоугольной формы. Эти колебания наблюдаются осциллографом 1,

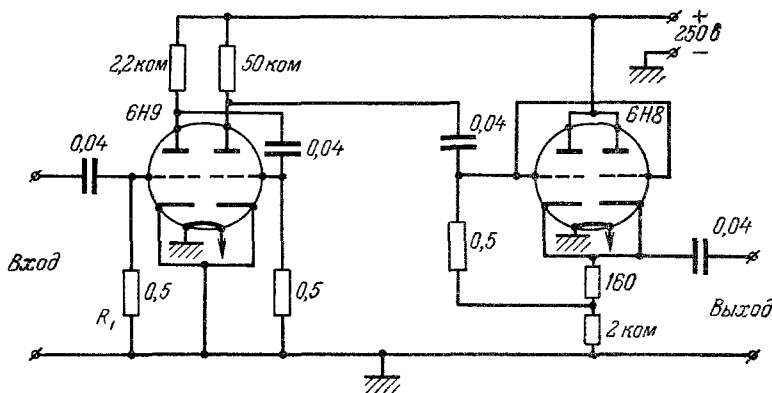


Рис. 7.

усилитель которого должен быть достаточно широкополосным, чтобы искажения формы прямоугольной волны были минимальными. Схема приставки показана на рис. 7. Лампа 6Н9 приставки работает без предварительного смещения рабочей точки. Поэтому при изменении амплитуды входного напряжения меняется величина тока сетки  $C_1$  лампы. Это вызывает изменение падения напряжения на сопротивлении  $R_1$ , т. е. смещение рабочей точки лампы 6Н9. Таким образом, при изменении амплитуды

входного напряжения меняется угол отсечки входного напряжения, что позволяет удобно регулировать скважность прямоугольных колебаний на выходе в пределах 0,2—0,5. Вторая лампа приставки работает в схеме катодного повторителя.

Как известно, спектр периодической последовательности прямоугольных импульсов, изображенной на рис. 8, представляется в виде следующего ряда Фурье:

$$u(t) = U_m \gamma + \frac{2U_m}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin n\pi\gamma \cdot \cos n\Omega t, \quad (1)$$

где скважность

$$\gamma = \frac{t'}{T}, \quad \Omega = \frac{2\pi}{T}.$$

Из выражения (1) следует, что гармонические составляющие, для которых выполнено равенство

$$\sin n\pi\gamma = 0, \quad \text{т. е. } n = \frac{1}{\gamma},$$

в спектре прямоугольной волны не содержатся. Это обстоятельство наглядно демонстрируется на описанной выше установке.

Порядок демонстрации опыта следующий:

Емкость переменного конденсатора  $C$  контура-анализатора увеличивается до значения, близкого к максимальному. Генератор звуковых колебаний настраивается на резонансную частоту контура. Затем при произвольном, но не равном 0,5 значении  $\gamma$  изменением емкости  $C$  по максимуму амплитуды колебаний на экране осциллографа 2 находится частота второй гармонической составляющей прямоугольных колебаний. Шкала конденсатора  $C$  должна показывать соответствующие резонансные частоты контура. После этого при неизменной частоте колебаний звукового генератора и настройке контура анализатора изменяется скважность прямоугольной волны. При значении  $\gamma = 0,5$ , что контролируется осциллографом 1, сигнал на экране осциллографа 2 почти полностью пропадает. Аналогичным образом можно демонстрировать выпадение из спектра 3-й и 4-й гармоник.

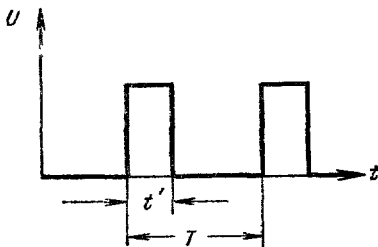


Рис. 8.

моник. Для этого необходимо настраивать генератор так, чтобы частота его колебаний была в два раза ниже резонансной частоты контура при максимальной емкости конденсатора контура. В этом случае диапазон частот, перекрываемый контуром, оказывается достаточным для наблюдения 3-й и 4-й гармонических составляющих прямоугольной волны.

### III. ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ КОЛЕБАТЕЛЬНОМ КОНТУРЕ ПРИ ДЕЙСТВИИ НА НЕГО ШУМОВОГО СИГНАЛА

Целью эксперимента является показать характер вынужденных колебаний в колебательном контуре при действии на него сигнала, имеющего сплошной спектр. Контур отзывается главным образом на те составляющие спектра сигнала, частоты которых близки к резонансной частоте контура.

Блок-схема экспериментальной установки показана на рис. 9. Напряжение с генератора шума через сопротивление подается на параллельный резонансный контур. Колебания напряжения на конденсаторе контура усиливаются усилителем низкой частоты и воспроизводятся динамиком. Включением различных по величинам емкостей конденсаторов (положения переключателя 2, 3, 4 и 5) скачкообразно изменяется резонансная частота контура. В положении переключателя 1 конденсатор контура отключается.

Демонстрацию опыта начинают при включении переключателя в положение 1. В этом случае динамик воспроизводит характерное для шумового сигнала шипение, в котором нельзя различить какой-либо определенный музыкальный тон. Одновременно шумовой сигнал наблюдается на экранах осциллографов 1 и 2. (Включение осциллографа 1 необязательно.) Затем последовательно включают в контур конденсаторы  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  и  $C_4$ . При этом заметно меняется вид осциллограммы напряжения на осциллографе 2. При каждом положении переключателя на экране преимущественно видны колебания определенной частоты. Вид осциллограммы существенно отличается от осциллограммы шумового сигнала, который наблюдается на осциллографе 1. Одновре-

менно в звучании динамика на фоне шума прослушивается определенный музыкальный тон. Величины емкостей  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  и  $C_4$  следует выбрать так, чтобы резонансные частоты контура соответствовали музыкальным тонам, составляющим аккорд.

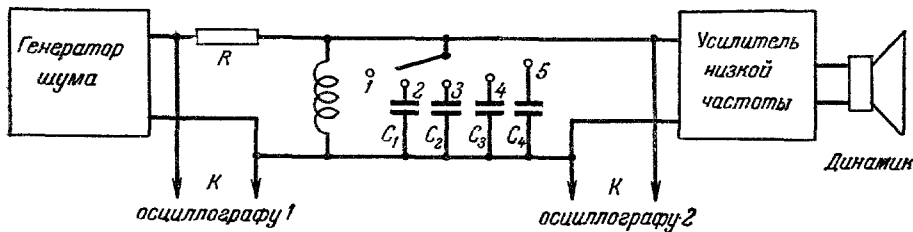


Рис. 9.

Пригодный для демонстрации генератор шума может быть легко изготовлен, так как никаких количественных измерений при опыте не производится. На рис. 10 показана схема такого генератора. Источником шума в этой схеме служит плохой

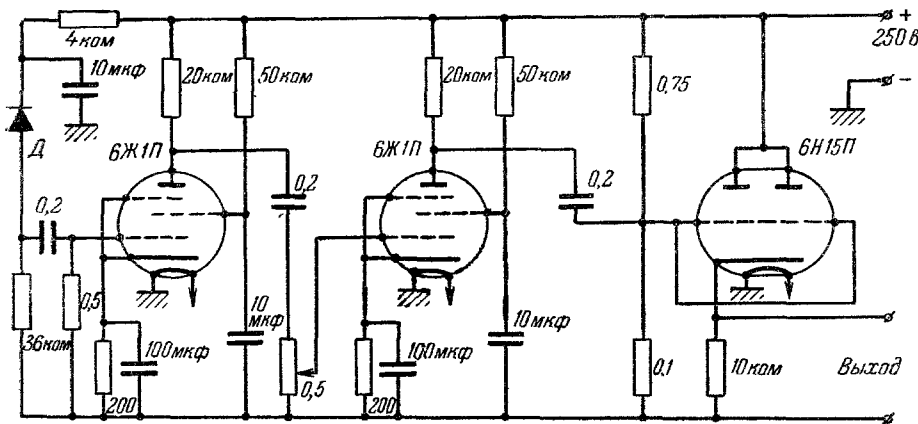


Рис. 10.

или специально испорченный, например перегревом или нарушением герметизации, полупроводниковый диод  $D$  (или один из переходов полупроводникового триода) со сравнительно большим, для маломощных приборов порядка 50 мка, обратным током.

#### IV. ДЕЙСТВИЕ ЭКРАНИРУЮЩЕЙ ИАНТИДИНАТРОННОЙ СЕТОК ПЕНТОДА

Предлагаемая лекционная демонстрация позволяет показать изменение коэффициента усиления по напряжению и динамической входной емкости электронной лампы при введении в нее экранирующей и антидинаatronной сеток. Для демонстрации используется пентод, который поочередно включается в триодный, тетродный и пентодный режимы. Схема установки показана на рис. 11. Анод, антидинаatronная сетка и экранирующая сетка пентода соединены соответственно с гнездами 3, 2 и 4. При включении закорачивающей колодки в гнезда 2, 3, 4 лампа работает в триодном режиме. При соединении колодкой гнезд 2—3 и другой колодкой гнезд 4—5 осуществляется тетродный режим работы. Для получения пентодного режима работы лампы колодками соединяются попарно гнезда 1—2 и 4—5.

1. Сравнение коэффициентов усиления по напряжению триода и пентода. На зажимы  $a-b$  схемы на рис. 11 подается напряжение с генератора низкочастотных колебаний (например, типа ЗГ-10). Частота колебаний выбирается в диапазоне 400—1000 гц. Выходное напряжение на нагрузке лампы наблюдается при помощи демонстрационного электронного осциллографа, подключенного к аноду лампы. Перед началом демонстрации амплитуда входного напряжения выбирается так, чтобы при максимальном значении выходное напряжение

не было по форме искаженным. Демонстрация производится в следующем порядке. Лампа включается в триодный режим. Сопротивление нагрузки лампы  $R_a$ , снабженное хорошо видимой в аудитории проградуированной шкалой устанавливается в положение  $R_a = 0$ . Затем сопротивление  $R_a$  постепенно увеличивается. Внимание слушателей обращается на то, что при малых  $R_a$  амплитуда выходного напряжения прибли-

зительно пропорциональна величине  $R_a$ , как это и следует из выражения для модуля коэффициента усиления  $|K|$  лампы с активной нагрузкой

$$|K| = \mu \frac{R_a}{R_i + R_a} \quad \text{при } R_a \ll R_i,$$

где  $R_i$  — внутреннее сопротивление лампы,  $\mu$  — ее статический коэффициент усиления. С ростом  $R_a$  скорость нарастания выходного напряжения уменьшается и при некоторых значениях  $R_a > R_i$  коэффициент усиления  $|K|$  постоянен и примерно равен  $\mu$ . Таким образом, наблюдая характер изменения выходного напряжения с увеличением  $R_a$ , можно определить порядок величины внутреннего сопротивления лампы. Следует обратить внимание на то, что при триодном включении лампы  $R_i$  имеет величину порядка нескольких десятков килоом.

Затем лампа (при выключенном напряжении питания!) переключается в пентодный режим, и повторяются измерения, сделанные в триодном режиме. При этом следует подчеркнуть, что во всем диапазоне изменения сопротивления  $R_a$  сохраняется прямая пропорциональность между  $R_a$  и амплитудой выходного напряжения. Это показывает, что в пентодном режиме

внутреннее сопротивление лампы  $R_i$  значительно выше, чем в триодном режиме, что позволяет почти во всех практических случаях рассчитывать  $|K|$  по формуле

$$|K| = SR_a,$$

где  $S$  — статистическая крутизна лампы. Внимание аудитории обращается на то, что при  $R_a \approx 40 \text{ ком}$  коэффициент усиления лампы в пентодном включении существенно больше, чем в триодном. При желании может быть опробован и тетродный режим работы лампы.

2. Сравнение входной динамической емкости триода, тетрода и пентода. Измерение входной динамической емкости лампы производится методом замещения. Для этого к зажимам  $a-b$  схемы на рис. 12 подключается колебательный контур, переменный конденсатор которого имеет демонстрационную шкалу, проградуированную в пикофарадах. На контур через сопротивление  $50 \text{ ком}$  подается амплитудно-модулированный сигнал с генератора ГСС-6 или аналогичного типа (рис. 12). Несущая частота сигнала подбирается равной резонансной частоте контура при величине емкости  $C$ , близкой к максимально возможной. Настройка контура в резонанс контролируется демонстрационным осциллографом, подключенным к зажимам  $e-g$ . Низкочастотный сигнал на этих зажимах получается посредством детектирования амплитудно-модулированного сигнала, поданного на контур. В качестве детектора целесообразно использовать точечный полупроводниковый диод. В установке должна быть предусмотрена возможность отключения входной цепи лампы от контура. Для этой цели удобно использовать пентод, вывод управляющей сетки которого размещен сверху на баллоне лампы (например, типа 6Ж7).

Демонстрация производится в следующем порядке. Лампа включается в триодный режим. Устанавливается значение  $R_a = 0$  и методом замещения измеряется статическая входная емкость триода. Затем включается сопротивление нагрузки

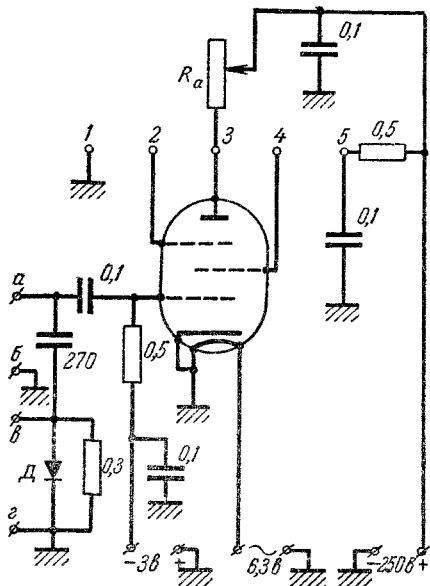


Рис. 11.

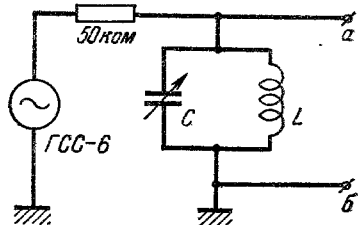


Рис. 12.



$R_a = 40 \text{ ком}$  и измеряется входная динамическая емкость триода, значительно превышающая статическую. Те же измерения проводятся в тетродном и пентодном включениях лампы при  $R_a = 40 \text{ ком}$ . Они показывают, что входная динамическая емкость уменьшается при переходе к тетродному режиму, и наименьшая в пентодном режиме. При измерении целесообразно составить на доске следующую таблицу:

	Значение $C$ при резонансе ( $n\phi$ )			Статическая емкость лампы ( $n\phi$ )	Динамическая емкость лампы при $R_a = 40 \text{ ком}$ ( $n\phi$ )
	при отключенной лампе	$R_a = 0$	$R_a = 40 \text{ ком}$		
Триод	109	100	55	9	54
Тетрод	109	100	70	9	39
Пентод	109	100	91	9	18

В таблице указаны значения, полученные на установке кабинета физических демонстраций МГУ. На результаты измерений сказывается довольно большая в демонстрационной установке паразитная емкость между цепями управляющей сетки и анода лампы. На это обстоятельство следует обратить внимание слушателей. В частности, оно поясняет все же сравнительно большое измеренное значение (см. таблицу) динамической входной емкости пентода 6Ж7.

Л. Н. Канцов

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. А. М. А з ъ я н и др., Полупроводниковые триоды в регенеративных схемах, М., Госэнергоиздат, 1959.