

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

---

Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ»

---

**КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ  
В ВАКУУМНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРАХ**

Методические указания  
к лабораторным работам  
по дисциплине  
«Вакуумная и плазменная электроника»

Санкт-Петербург  
Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

2013

УДК 621.372, 621.375.2, 621.382, 621.385

Колебательные процессы в вакуумных электронных приборах: методические указания к лаб. работам по дисциплине «Вакуумная и плазменная электроника» / сост.: А. Д. Тупицын, А. К. Шануренко. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. 28 с.

Содержат описание лабораторных работ по изучению процессов модуляции потока заряженных частиц и преобразования его энергии в вакуумных электронных приборах.

Предназначены для студентов, обучающихся по направлению 210100.62 «Электроника и наноэлектроника».

Утверждено  
редакционно-издательским советом университета  
в качестве методических указаний

© СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013

## **Введение**

Принципы действия разных по функциональному назначению вакуумных электронных приборов и устройств (ВЭПУ) в общем случае слагаются из четырех основных обобщенных процессов [1]:

- получения свободных заряженных частиц (электронов, ионов);
- создания (формирования) потока заряженных частиц;
- управления потоком заряженных частиц (модуляции);
- преобразования энергии потока заряженных частиц в энергию выходного сигнала и в другие виды энергии.

Данные методические указания посвящены описанию работ по изучению двух последних обобщённых процессов – модуляции потока заряженных частиц и преобразования энергии потока заряженных частиц. Описание двух первых обобщённых процессов и лабораторных работ, посвящённых их изучению, приведено в [1] и [2].

Лабораторные работы выполняются с применением лабораторного макета, описание которого приведено далее в тексте настоящих указаний. Внешний вид макета, расположение органов управления, указания к работе с ним и применяемыми в лаборатории радиоизмерительными приборами также приведены в данных методических указаниях, экземпляр которых имеется на каждом рабочем месте.

Перед началом лабораторных работ студенты должны ознакомиться с настоящим изданием, с лабораторным макетом и пройти инструктаж по технике безопасности. Для допуска к очередной лабораторной работе студент должен знать цель исследования, основные характеристики и параметры исследуемых электронных приборов, схему экспериментальной установки и порядок выполнения работы. При подготовке к лабораторным работам следует использовать учебно-методическую литературу [1] – [4].

Включать установку можно *только* с разрешения преподавателя или лаборанта.

По окончании каждой работы её черновики подписываются преподавателем и прикладываются к отчету по лабораторной работе. Отчеты по работам, выполненные на предыдущем занятии, предоставляются преподавателю на следующем занятии.

Отчет должен содержать титульный лист, цель работы, схемы установок, основные параметры объектов исследования, результаты всех измерений

и расчетов в виде таблиц и графиков, а также выводы по проделанной работе. Также должны быть приведены расчётные формулы с примерами подстановки исходных данных и раскрытием физического смысла элементов формул. Все рисунки и таблицы должны иметь номера. Рисунки могут иметь поясняющие надписи. Допускается рукописное оформление отчётов.

## 1. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО МАКЕТА

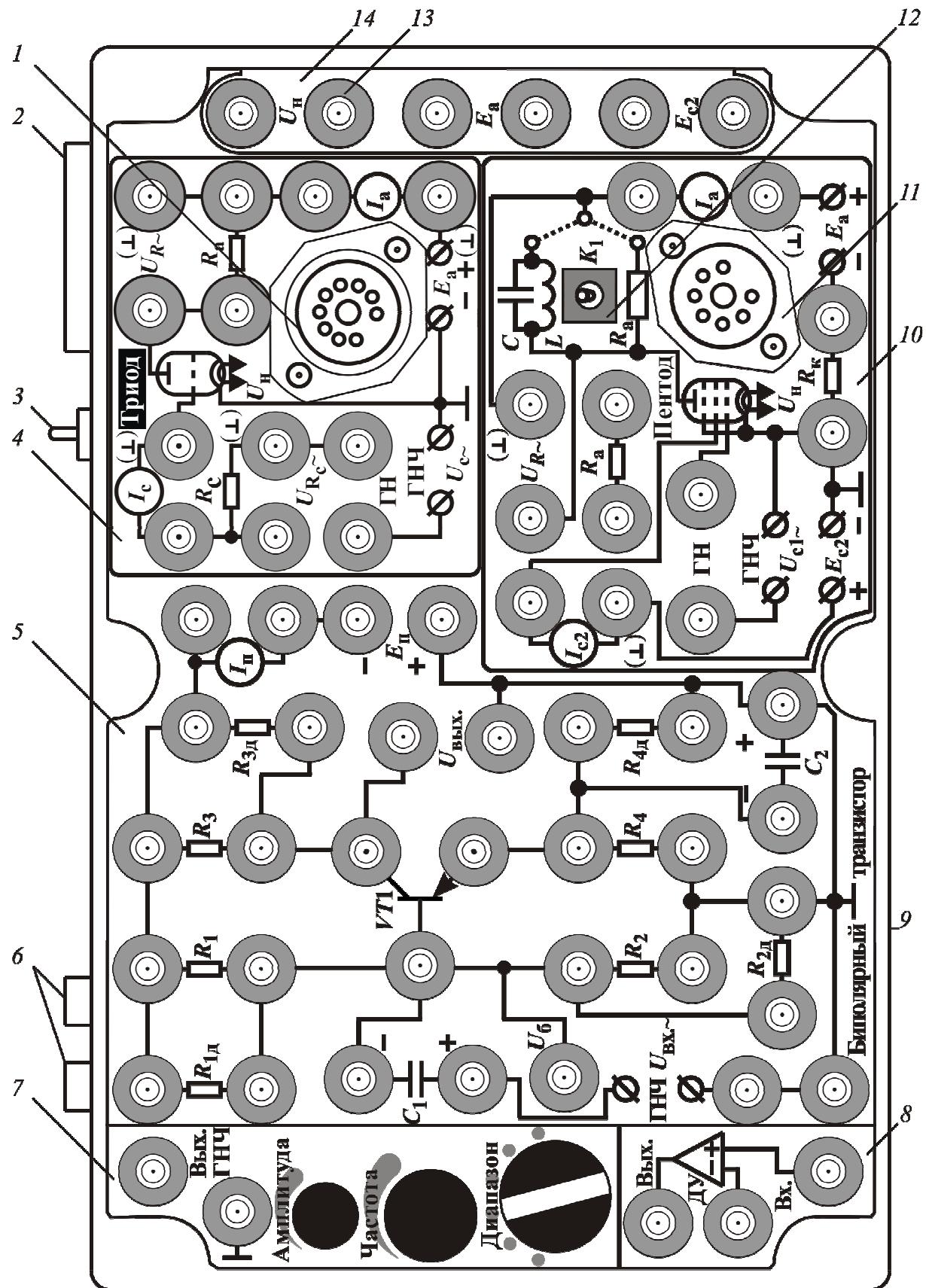
Лабораторный макет, используемый для исследования колебательных режимов в схемах с применением электронных ламп (и полупроводниковых приборов), имеется на каждом рабочем месте. Макет размещён в пластмассовом корпусе, внутри которого соединены необходимые для выполнения работ элементы. На лицевой панели имеются коммутационные гнёзда и принципиальные схемы устройств (усилителей напряжения), на примере которых производятся исследования названных процессов.

Внешний вид макета представлен на рис. 1.1. Его лицевая панель разбита на несколько полей: поле «Триод» 4, поле «Биполярный транзистор» 5, поле «Генератор низкой частоты» (ГНЧ) 7, поле «Дифференциальный усилитель» (ДУ) 8, поле «Пентод» 10 и поле «Напряжения питания» 14.

Поле «Напряжения питания» 14 используется для подачи напряжений от внешних источников, необходимых для работы исследуемых схем: напряжения накала  $U_H$ , анодного напряжения  $E_a$  и напряжения экранной сетки  $E_{c2}$ . Подача напряжений осуществляется с помощью внешних проводников, соединяющих источники с соответствующими гнёздами (например, 13) на макете.

Поле ГНЧ 7 содержит органы управления генератора, используемого для подачи синусоидального напряжения на исследуемые усилители. К ним относятся ручки «Амплитуда» и «Частота», а также – переключатель «Диапазон» для выбора диапазона частот колебаний. На этом же поле имеется пара гнёзд «Вых. ГНЧ» для измерения амплитуды и частоты колебаний на выходе ГНЧ. Выход ГНЧ соединён с исследуемыми схемами внутри макета.

Поле «Дифференциальный усилитель» (ДУ) позволяет усиливать малые постоянные напряжения, имеющиеся в исследуемых схемах, для повышения точности измерения. Оно содержит два входных гнезда «Вх.» и выходное «Вых.». Коэффициент усиления по напряжению усилителя составляет 10. Усилитель задействуется только по указанию преподавателя.



Puc. 1.1

Поле «Биполярный транзистор» 5 позволяет исследовать поведение биполярного (или полевого) транзистора в схеме усилителя напряжения. Дан-

ное поле макета используется в рамках работ по дисциплине «Твердотельная электроника» и здесь не описывается.

Элементы макета, расположенные на поле «Триод» 4 позволяют собирать и исследовать триодный усилитель напряжения и процессы в нём. Для подключения вакуумного триода к макету на нём имеются соответствующая ламповая панель 1 и ряд гнёзд, позволяющих подключать измерительные приборы к интересующим точкам схемы. Гнёзда  $R_a$  предназначены для подключения внешней резистивной нагрузки усилителя.

Поле «Пентод» 10 содержит ламповую панель 11 для подключения пентода. Переключатель  $K_1$  12 позволяет включать в анодную цепь пентодного усилителя напряжения колебательную ( $LC$ ) или резистивную ( $R_a$ ) нагрузку. При этом элементы колебательного контура располагаются внутри макета и не могут быть изменены, а резистивная нагрузка может быть произвольной, так как представляет собой внешний резистор, подключаемый к гнёздам  $R_a$  на поле «Пентод» 10.

Следует отметить, что на полях «Триод» 4, «Пентод» 10 и «Биполярный транзистор» 5 между гнёздами, предназначенными для подключения внешних измерителей тока (амперметров), включены измерительные сопротивления значением 10 Ом. Токи в данных цепях определяются по падению напряжения на измерительных сопротивлениях. Это позволяет использовать один многофункциональный измеритель – мультиметр для измерения различных токов и напряжений в схемах, попеременно подключая мультиметр к соответствующим гнёздам схем. Кроме того, в схемах на полях «Триод» 4 и «Пентод» 10 имеются резисторы  $R_C$  и  $R_K$ , предназначенные для измерения и наблюдения формы токов сетки в триодном усилителе и тока катода в пентодном. Сопротивления этих резисторов также составляют 10 Ом. Напряжения с анодных нагрузок  $R_a$  триода, тетрода и пентода и с колебательного контура  $LC$  поступают для их измерения с помощью осциллографа на гнёзда  $U_{R\sim}$  через делитель напряжения 1:10.

Ряд гнёзд на различных полях отмечены символом  $\perp$  (общая точка схемы, корпус, «земля»). Все они электрически соединены между собой и равнозначны. Данные гнёзда необходимо соединять с экранирующей оплёткой

осциллографического кабеля для увеличения помехоустойчивости измерений.

Кроме описанных элементов на корпусе лабораторного макета имеются разъём 2 для подключения кабеля питания, выключатель питания 3 и светодиодный индикатор питания 9 на прозрачной боковой панели.

Для обеспечения стабильности осцилограмм сигналов, наблюдавшихся с помощью макета, осциллограф, подключаемый к схемам, работает в режиме внешнего запуска – синхронно с ГНЧ. Для этого используется специальный выход синхронизации ГНЧ 6, подключаемый к входу внешней синхронизации осциллографа. Выход находится на задней стенке макета и представляет собой два гнезда, одно из которых подключается к экранирующей оплётке соединительного кабеля, другое (красное – нижнее на рис. 1.1) – к его центральному проводнику.

## 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА МОДУЛЯЦИИ ЭЛЕКТРОННЫХ ПОТОКОВ В ВАКУУМНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРАХ (ВЭПУ)

**Цель работы:** изучение квазистатических способов модуляции (управления) тока в пентоде в режимах 1-го и 2-го родов, а также влияния сопротивления анодной нагрузки на управляемую характеристику лампы.

### 2.1. Основные понятия, термины и определения

**Способы модуляции электронного потока.** *Модуляция* электронного потока – это изменение во времени по заданному закону его параметров, определяющих выполнение основной функции ВЭПУ. Модуляция осуществляется при взаимодействии электронного потока с переменным электромагнитным полем (или с его составляющими – электрическим либо магнитным полем), которое изменяет характер движения электронов (их траектории) и тем самым вызывает отклонение параметров электронного потока от исходных значений. Следовательно, способы модуляции можно классифицировать как по типу модулирующих полей (электрические, магнитные), так и по названию изменяемых параметров потока.

При осуществлении того или иного способа модуляции важное значение имеет соотношение времени пролета  $\tau_e$  электронов между электродами (в пространстве взаимодействия) и периодом  $T$  модулирующего напряжения. Способы модуляции, реализуемые при условии  $\tau_e \ll T$ , называются *квази-*

*статическими*, а при  $\tau_e \geq T$  – *динамическими*. К последним относится способ скоростной модуляции, реализуемый в микроволновых электронных приборах. В электронных лампах используются квазистатические способы модуляции электронного потока.

В триодном усилителе модулирующее устройство совмещено с преобразующим устройством (рис. 2.1), поэтому в его анодную цепь всегда включено активное сопротивление  $R_a$ , на котором анодный ток создает падение напряжения  $U_R = I_a R_a$  (рис. 2.1). В связи с этим анодное напряжение становится равным  $U_a = E_a - U_R = E_a - I_a R_a$  и выражение для катодного тока примет вид

$$I_k = G U_{\text{д}}^{3/2} \approx G [U_c + D(E_a - I_a R_a)]^{3/2}. \quad (2.1)$$

Из (2.1) видно, что падение напряжения на сопротивлении  $R_a$  понижает действующий потенциал, а вместе с ним и катодный ток, причем тем больше,

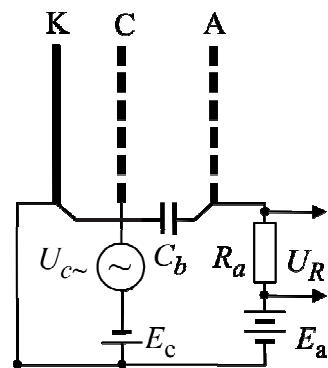


Рис. 2.1

чем выше значение  $R_a$ . Этот результат следует рассматривать как проявление внутренней обратной связи выходной цепи с входной, приводящей к уменьшению крутизны наклона управляемой характеристики  $I_k$  от  $U_c$  и одновременно к ее спрямлению (рис. 2.2).

В тетродных и пентодных усилителях из-за малой общей проницаемости ламп подобного явления не наблюдается. Крутизна и нелинейность их управляемых характеристик от сопротивления  $R_a$  практически не зависят.

#### Режимы модуляции катодного тока:

- *режимы 1-го рода*, характеризующиеся тем, что модулирующее электрическое поле в промежутке взаимодействия сохраняется положительным в течение всего периода его изменения, поэтому конвекционный ток проходит через модулирующее устройство также

в течение всего периода;

- *режимы 2-го рода*, характеризующиеся тем, что модулирующее электрическое поле в указанном промежутке сохраняется положительным только в часть периода, равную  $2\theta < 2\pi$ , поэтому ток проходит через модулирующее устройство только в течение данной части периода. Режимы 2-го рода назы-

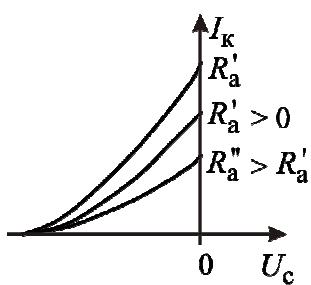


Рис. 2.2

вают также *режимами с «отсечкой»* катодного тока, а величину  $\theta$  – углом отсечки. Таким образом, если первая группа характеризуется равенством  $2\theta = 2\pi$ , или  $\theta = \pi$ , то вторая – неравенством  $\theta < \pi$  (здесь  $2\theta$  – длительность импульса тока).

С целью конкретизации (уточнения) режимов модуляции внутри каждого рода колебаний вводятся классы колебаний. В группе режимов 1-го рода таковыми являются классы  $A$ ,  $A_1$ ,  $A_2$ . Наибольшее распространение получил класс  $A$ , который характеризуется использованием только прямолинейного участка управляемой характеристики, лежащего в области  $U_c \leq 0$ . Благодаря этому обеспечивается минимальное искажение формы катодного (и анодного) тока по отношению к форме управляемого напряжения. В этом заключается главное достоинство класса  $A$ .

На рис. 2.3 представлен интегральный график, иллюстрирующий модуляцию катодного тока в режиме класса  $A$ . Он объединяет три частных графика: управляемую характеристику  $I_k$  от  $U_c$ , кривую изменения потенциала сетки, изменяющегося по закону  $u_c = -E_c + U_{c_m} \sin \omega t$ , и кривую изменения катодного тока  $i_k = I_{k0} + I_{k_m} \sin \omega t$ , где  $E_c$  и  $I_{k0}$  – постоянные составляющие потенциала сетки и катодного тока, а  $U_{c_m}$  и  $I_{k_m}$  – их амплитудные значения.

Из рис. 2.3 видно, что изменения  $u_c$  и  $i_k$  не выходят за пределы почти прямолинейного участка  $bc$  управляемой характеристики, что соответствует классу  $A$ . Недостатком этого класса является то, что эмиссионная способность катода используется не полностью. Кроме того, постоянная составляющая катодного тока не зависит от амплитуды управляемого напряжения, что приводит к низкому коэффициенту полезного действия (КПД) усилительных устройств. В классе  $A_1$  используется весь участок управляемой характеристики, лежащий в области  $U_c \leq 0$ , а в классе  $A_2$  – вся управляемая характеристика.

В группе режимов 2-го рода выделяют также три класса колебаний, раз-

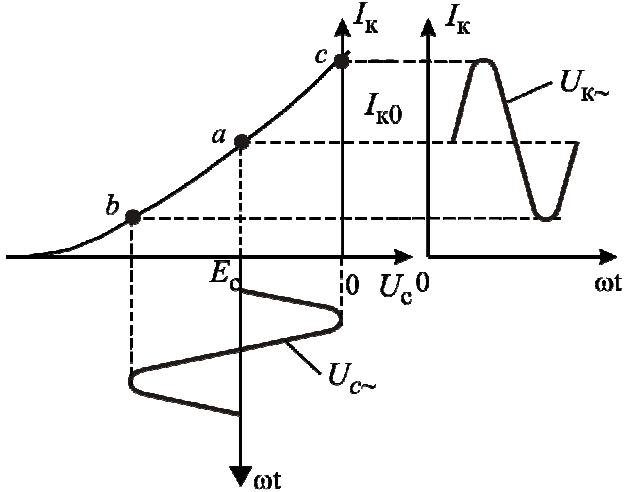


Рис. 2.3

личающиеся значениями угла отсечки: класс  $AB$  ( $\frac{\pi}{2} < \theta < \pi$ ), класс  $B$  ( $\theta = \pi/2$ ) и класс  $C$  ( $\theta < \pi/2$ ).

Углы отсечки анодного и сеточного токов определяются выражениями

$$\theta = \arccos \frac{U_{c_{\text{зап}}} - E_c}{U_{c_m}}; \quad \theta_c = \arccos (-E_c / U_{c_m}).$$

Следует заметить, что отсечка сеточного тока будет иметь место не только в режимах колебаний 2-го рода, но и в режиме колебаний 1-го рода класса  $A_2$ .

На рис. 2.4 представлен интегральный график, иллюстрирующий все три

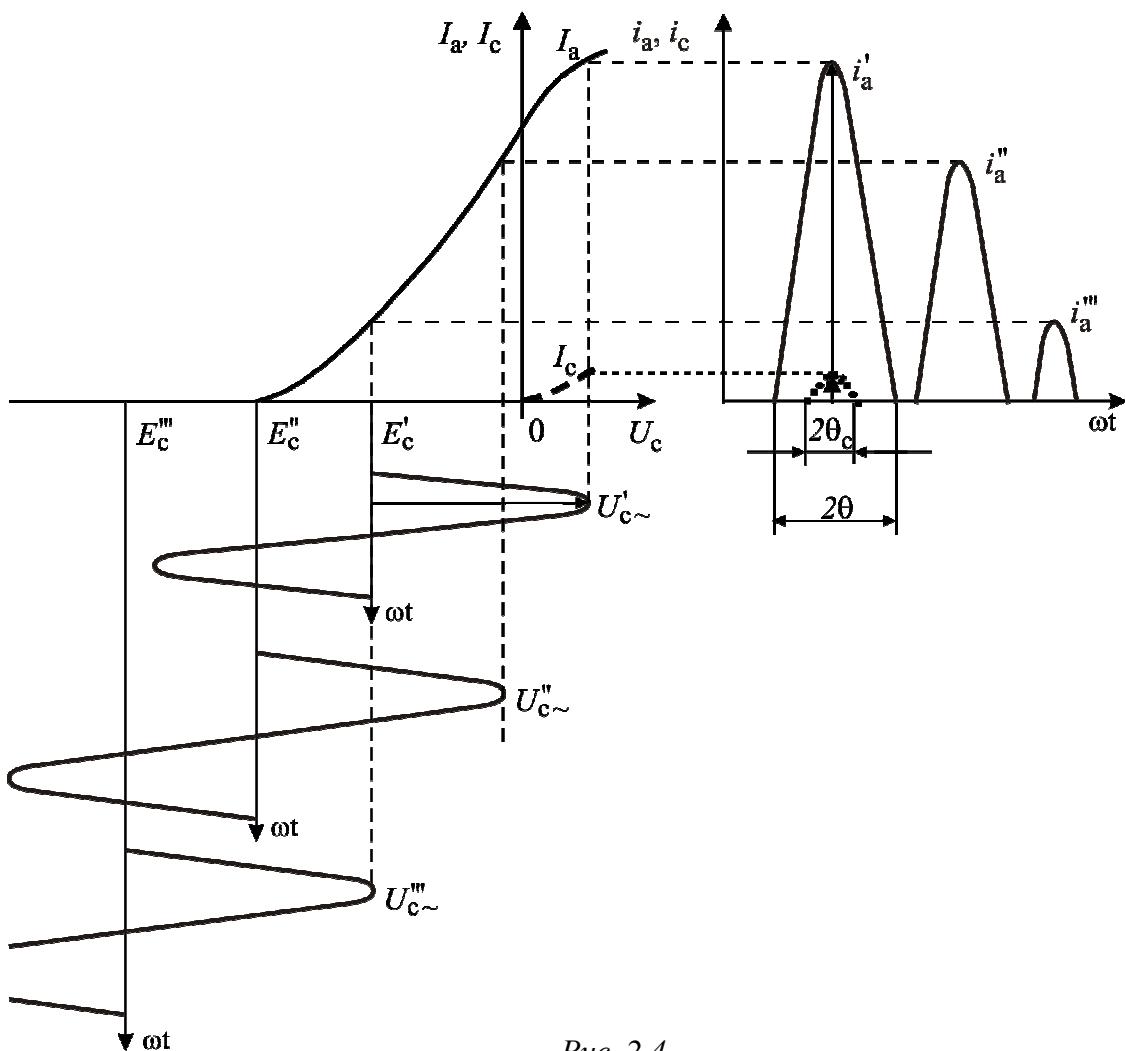


Рис. 2.4

класса режимов управления 2-го рода. Модулирующее напряжение представлено ускоряющим полупериодом синусоиды. Из рис. 2.4 видно, что переход от режима класса  $AB$  к режиму класса  $B$  и к классу  $C$  осуществляется увеличением отрицательного напряжения смещения.

## 2.2. Схема измерительной установки

Схема для исследования управляющих характеристик триода и самого процесса управления тока в нем представлена на рис. 2.5. Она содержит источники смещения в цепи управляющей сетки ГН (генератор напряжения) и анодного напряжения  $E_a$ , измерительные приборы, источник переменного напряжения – генератор низкой частоты ГНЧ, сопротивления в цепях анода  $R_a$  (нагрузка) и сетки  $R_c$  для измерения с помощью осциллографа переменных напряжений  $U_{R\sim}$  и  $U_{R_{c\sim}}$ , пропорциональных токам  $I_{a\sim}$  и  $I_{c\sim}$ . Кроме того, с помощью осциллографа можно измерить переменное напряжение в цепи сетки  $U_{c\sim}$ .

## 2.3. Порядок выполнения работы

1. Выписать из справочника [4] данные, относящиеся к исследуемому триоду.
2. Собрать схему для исследования процессов управления анодным током в триоде (рис. 2.5).
3. Снять статические характеристики управления  $I_c = f_1(U_{c0})$  (сеточные) и  $I_a = f_2(U_{c0})$  (анодно-сеточные) при постоянном анодном напряжении и трех значениях сопротивления  $R_a$ .

Для измерения сеточных характеристик  $I_c = f_1(U_{c0})$  убедиться, что питание макета выключено: выключатель 3 находится в нижнем положении и светодиодный индикатор 9 не светится (см. рис. 1.1). При этом ГНЧ исключается из схемы измерительной установки (см. рис. 2.5) и в возникший разрыв цепи можно включить измеритель тока. Сеточные токи измерять с помощью мультиметра, переведённого в режим измерения токов. Для этого переключатель рода работ установить на токовый предел 4 мА и присоединить мультиметр с помощью проводников к

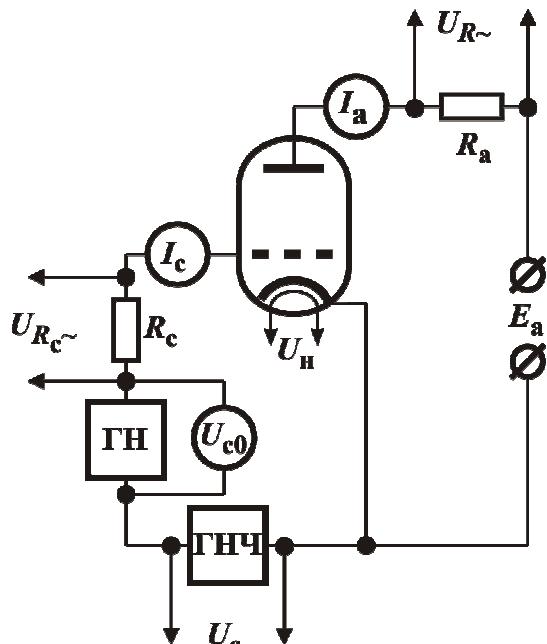


Рис. 2.5

гнёздам «Вых. ГНЧ» на поле ГНЧ 7 (см. рис 1.1). Гнездо «СОМ[МОН]» (общее) мультиметра соединить с выходным гнездом ГНЧ, обозначенным символом , гнездо I мультиметра – со вторым гнездом на поле «ГНЧ». Теперь в сеточную цепь вместо ГНЧ включён мультиметр – измеритель тока. Изменяя сеточное напряжение с помощью внешнего генератора напряжения ГН, подключённого проводниками к гнёздам ГН на поле «Триод» 4 макета (отрицательным полюсом к сетке), измерить сеточные характеристики для трёх сопротивлений нагрузки. Напряжение, подаваемое на сетку, считывается с индикатора выходного напряжения внешнего ГН. Характеристики снимать для  $U_{c0} \leq 0$  до  $I_c = 0$ .

Перед измерением анодно-сеточных характеристик  $I_a = f_2(U_{c0})$  отключить мультиметр от гнёзд на поле «ГНЧ» и установить переключатель рода его работ в положение измерения постоянных напряжений. Убедиться, что регулятор «Амплитуда» на поле «ГНЧ» установлен в положение минимума выходного напряжения генератора – до упора против часовой стрелки. Подключить мультиметр проводниками к гнёздам, соединённым по схеме на поле «Триод» лицевой панели макета с измерителем анодного тока  $I_a$ . Следует напомнить, что в этом случае анодный ток определяется по падению напряжения на резисторе сопротивлением 10 Ом, включённом между этими гнёздами внутри макета. Включить питание макета выключателем 3 (см. рис. 1.1). Анодно-сеточные характеристики снимать для  $U_{c0} \leq 0$ , начиная с напряжения запирания лампы  $U_{c\text{ зап.}}$ , при котором  $I_a = 0$ .

4. Включить осциллограф. Снять зависимость амплитуды анодного тока от амплитуды напряжения генератора низкой частоты в режиме колебаний 1-го рода. Для этого вначале установить с помощью ГН напряжение смещения на сетке  $U_{c0} \approx (0.3 \dots 0.5) U_{c\text{ зап.}}$ . Для измерения напряжений  $U_{R\sim}$  на нагрузке  $R_a$  необходимо подключить осциллограф к гнёздам  $U_{R\sim}$ , причём экранирующая оплётка кабеля должна быть подсоединенена к гнезду, отмеченному символом  (общая точка схемы). Следует напомнить, что все гнёзда, отмеченные этим символом, на полях «Триод», «Пентод» и «Биполярный транзистор» электрически соединены и равнозначны. Кроме того, напряжения, поступающие на гнёзда  $U_{R\sim}$ , уменьшены резистивным делителем в 10 раз относительно их реальных значений.

Затем увеличивать напряжение  $U_{c\sim}$  с помощью ГНЧ до появления искажений (ограничений полуволн) синусоидального напряжения на сопротивлении  $R_a$ . Если ограничения полуволн несимметричны, следует несколько изменить  $U_{c0}$ , чтобы ограничения полуволн при увеличении  $U_{c\sim}$  появлялись одновременно. После этого нужно зафиксировать реальное значение  $U_{c0}$ .

Для проведения исследования режима колебаний 1-го рода измерять амплитуды напряжений  $U_{R\sim}$  и  $U_{c\sim}$ , а также постоянную составляющую анодного тока  $I_{a0}$ . Напряжение  $U_{c\sim}$  изменять с помощью ГНЧ до максимально возможного значения. Измерение  $U_{c\sim}$  производится с помощью осциллографа, подключаемого к гнёздам «Вых. ГНЧ». Рекомендуемые значения  $U_{c\sim}$  (размах – удвоенная амплитуда): 8, 4, 2, 1, 0.5 В. Результаты измерений заносятся в таблицу.

5. Перевести лампу в режим колебаний 2-го рода. Для этого установить с помощью ГН напряжение смещения на сетке  $U_{c0} = U_c$  зап, соответствующее классу *B*. Установку классов колебаний производить при подаче на сетку напряжения ГНЧ с максимальной амплитудой. Измерить по осциллографу напряжения  $U_{R\sim}$  и  $U_{R_{c\sim}}$  (размахи), времена протекания анодного  $\tau_a$  и сеточного  $\tau_c$  токов через лампу, попеременно подключая осциллограф к гнёздам  $U_{R_{c\sim}}$  и  $U_{R\sim}$ , и период переменного напряжения  $T$ , необходимые для определения углов отсечки  $\theta$  и  $\theta_c$ :  $\theta = \pi \frac{\tau_a}{T}$  и  $\theta_c = \pi \frac{\tau_c}{T}$ , а также постоянные составляющие анодного  $I_{a0}$  и сеточного  $I_{c0}$  токов. Измерения провести при нескольких значениях напряжения  $U_{c\sim}$ . Рекомендуемые значения  $U_{c\sim}$  (размах – удвоенная амплитуда): 8, 4, 2, 1, 0.5 В.

6. Установить напряжение смещения на сетке  $U_{c0}$ , соответствующее классу *AB*:  $U_{c0} > U_c$  зап, и повторить измерения по п. 5. Затем установить режим класса *C*:  $U_{c0} < U_c$  зап, и повторить измерения по п. 5. Для каждого из исследуемых классов колебаний зафиксировать постоянную составляющую сеточного потенциала  $U_{c0}$ , обеспечивающую данный режим и неизменную в пределах исследования данного класса.

## **2.4. Содержание отчёта**

Отчёт должен содержать:

1. Цель работы.
2. Типы и справочные данные исследуемых вакуумных электронных приборов.
3. Схемы измерительных установок.
4. Результаты измерений в виде таблиц и соответствующих графиков.
5. Результаты вычислений крутизны  $S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_c}$  для режимов колебаний первого рода в виде таблиц и графиков при трёх сопротивлениях нагрузки.
6. Результаты вычислений углов отсечек анодного и сеточного токов для всех исследованных колебательных режимов.
7. Графики зависимостей  $I_a(\omega t)$  по результатам измерений (аналогичные представленным на рис. 2.4) – по одной для каждого из исследованных режимов колебаний. Протяжённость каждой зависимости должна составлять не менее одного периода колебаний. Каждый график должен состоять из десяти или более точек. Рекомендуется строить зависимости для максимальных переменных сеточных напряжений.
8. Выводы по работе.

## **2.5. Контрольные вопросы**

1. Назовите способы управления анодным током в электронных лампах.
2. Какие известны режимы управления током в лампах?
3. Что такое угол отсечки, и чем определяется его значение?
4. Укажите особенности режимов колебаний 1-го рода:  $A$ ,  $A_1$  и  $A_2$ .
5. Укажите особенности режимов колебаний 2-го рода:  $AB$ ,  $B$  и  $C$ .

## **3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОННОГО ПОТОКА В ЛАМПОВЫХ УСИЛИТЕЛЯХ**

**Цель работы:** изучение режимов преобразования энергии модулированного электронного потока; определение основных параметров, характеризующих эти режимы; изучение особенностей работы лампы с колебательным контуром в анодной цепи.

### 3.1. Основные понятия, термины и определения

Преобразование энергии электронного потока в энергию выходного сигнала является последним из основных физических процессов, составляющих принципы действия различных по назначению электронных приборов и устройств. В ламповых усилителях этот процесс основан на взаимодействии электронного потока с электромагнитным полем и осуществляется в специальных преобразующих устройствах. В простейшем случае преобразующее устройство состоит из диодного вакуумного промежутка (или пространства) взаимодействия и подключенной к этому промежутку внешней цепи с нагрузочным (анодным) сопротивлением того или иного типа (резистором или колебательным контуром). На рис. 3.1 представлена схема одного из таких устройств, в котором электроды промежутка взаимодействия  $C_i$  и  $A$  имеют одинаковые потенциалы  $E_a$ ; в качестве нагрузочного сопротивления используется колебательный  $LC$ -контур, настроенный в резонанс на частоту управляющего напряжения, к которому через трансформаторную связь с помощью клемм  $aa$  может быть подключен потребитель энергии выходного сигнала.

Предположим, что модулированный электронный поток, прошедший промежуток  $C_i - A$ , характеризуется переменным конвекционным током  $i_a(\omega t)$ . Если при этом время пролета электронов через указанный промежуток  $\tau_e \ll T$ , где  $T = 2\pi/\omega$  – период управляющего напряжения и  $\omega$  – круговая частота, то во внешней цепи будет протекать такой же ток проводимости и создавать на колебательном контуре падение напряжения  $U_R(\omega t) = i_a(\omega t)R_3$ , где  $R_3$  – активное эквивалентное сопротивление контура. В этом случае анодное напряжение будет изменяться по закону  $U_a(\omega t) = E_a - U_R(\omega t)$  и создавать в промежутке  $C_i - A$  переменное электрическое поле. Противофазные изменения тока  $i_a(\omega t)$  и напряжения  $U_a(\omega t)$  имеют принципиальное значение для преобразования энергии электронного потока в энергию выходного сигнала в любом электронном усилителе или в генераторе с самовозбуждением, поэтому указанное условие обычно называют *генераторным режимом преобразования энергии*. В дан-

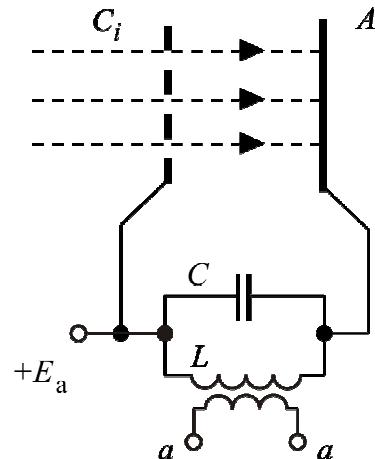


Рис. 3.1

ном режиме в тормозящий полупериод электрического поля в пространство взаимодействия входит большее число электронов, чем в ускоряющий полуperiод, поэтому в среднем за период модулированный электронный поток отдает полю некоторую энергию, которая и определяет энергетический эффект взаимодействия электронов с полем. Основными параметрами, характеризующими процесс преобразования энергии электронного потока, являются средняя преобразованная (или колебательная) мощность  $P_{\sim}$ , выделяющаяся в нагрузочном сопротивлении, КПД преобразования  $\eta_e$  и мощность рассеяния  $P_a$  на аноде.

В квазистатическом приближении колебательная мощность определяется формулой  $P_{\sim} = \frac{1}{2} I_{a_1} U_{R_m} = \frac{1}{2} \alpha_1 I_{a_m} U_{R_m}$ , где  $\alpha_1$  и  $I_{a_1} = \alpha_1 I_{a_m}$  – коэффициент и амплитуда первой гармоники анодного тока,  $U_{R_m}$  – амплитуда напряжения на нагрузочном сопротивлении.

КПД преобразования определяется как отношение колебательной мощности к средней мощности электронного потока, прошедшего через промежуток взаимодействия  $P_0$ , т. е.  $\eta_e = \frac{P_{\sim}}{P_0} = \frac{1}{2} \frac{I_{a_1} U_{R_m}}{I_{a_0} E_a} = \frac{1}{2} \gamma_1 \xi$ , где  $P_0 = I_{a_0} E_a$ ;

$I_{a_0}$  – постоянная составляющая анодного тока;  $\gamma_1 = I_{a_1} / I_{a_0}$  и  $\xi = U_{R_m} / E_a$  – коэффициенты использования анодного тока и напряжения.

Мощность рассеяния на аноде определяется как разность между средней и колебательной мощностями:  $P_a = P_0 - P_{\sim}$ .

Из приведенных выражений следует, что для получения максимальных значений  $P_{\sim}$  и  $\eta_e$  необходимо иметь возможно большие значения амплитуд  $I_{a_m}$  и  $U_{R_m}$ . При этом во избежание режима возврата и динатронного эффекта анода необходимо выполнение условия  $u_{a_{\min}} = E_a - u_{R_{\max}} \geq 0$ . Вот почему в мощных тетродных и пентодных усилителях  $E_{c_2} = (0.1 \dots 0.15)E_a$ .

На рис. 3.2 приведен интегральный график, иллюстрирующий явление ограничения максимальной амплитуды анодного тока в пентодном усилителе, возникающее при изменении режима токопрохождения, т. е. при переходе от режима перехвата (РП) к режиму возврата (РВ).

Основу графика составляют зависимости анодного тока  $I_a$  и тока экранирующей сетки  $I_{c_2}$  от потенциала на первой сетке  $U_{c_1}$  при постоянных

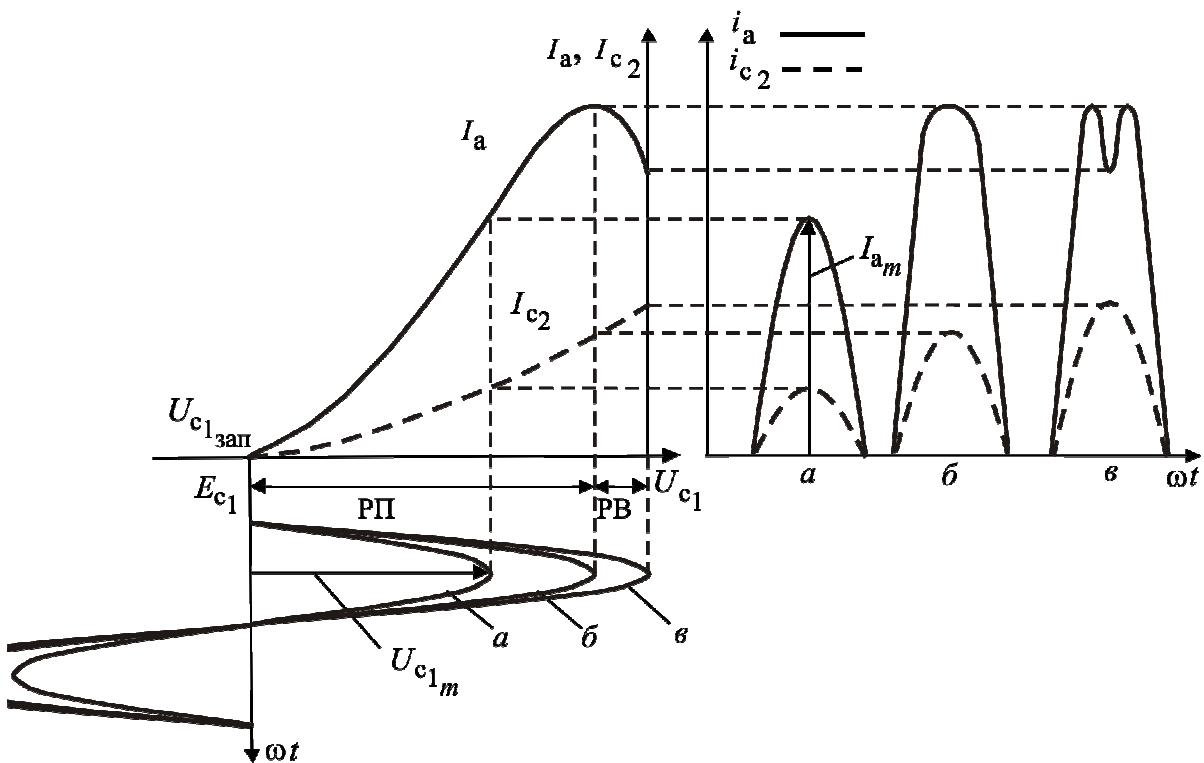


Рис. 3.2

значениях потенциалов всех других электродов и при заданном значении нагрузочного сопротивления  $R_a$ . Поскольку указанные зависимости лежат в области  $U_{c_1} \leq 0$ , то первая сетка не перехватывает электроны и катодный ток распределяется только между экранной сеткой и анодом.

Следовательно,  $I_a = \delta I_k$  и  $I_{c_2} = (1 - \delta)I_k$ , где  $\delta = f(u_a / E_{c_2})$ , при условии, что катодный ток не зависит от  $u_a$  и регулируется с помощью напряжения первой сетки, изменяющегося по закону  $u_{c_1} = -E_{c_1} + U_{c_1m} \sin \omega t$ . На графике (рис. 3.2) показаны периоды этого напряжения при трех значениях амплитуды  $U_{c_1m}$  и для класса  $B$ . Каждому из этих напряжений ( $a$ ,  $b$ ,  $c$ ) соответствуют импульсы токов  $I_a$  и  $I_{c_2}$ . Таким образом, при увеличении  $U_{c_1}$  возрастают ток  $I_a$  и напряжение  $U_R$ . Это происходит до тех пор, пока выполняется условие  $u_{a\min} = E_a - u_{R\max} \geq 0$ . Когда же оно перестанет выполняться, т. е. окажется, что  $u_{a\min} < E_{c_2}$ , наступит ограничение тока  $I_a$  и появятся искажения формы его импульса.

В зависимости от соотношения  $u_{a_{\min}} / E_{c_2}$  различают три режима работы преобразующего устройства:

- 1) *недонапряженный*, характеризующийся неравенством  $u_{a_{\min}} > E_{c_2}$ , при котором лампа в течение всего периода управляющего напряжения работает в режиме прямого перехвата (РП), когда  $I_{c_2} \ll I_a$ ;
- 2) *критический*, для которого характерно соотношение  $u_{a_{\min}} \approx E_{c_2}$  и лампа по-прежнему работает в режиме перехвата ( $I_{c_2} \ll I_a$ );
- 3) *перенапряженный*, характеризующийся неравенством  $u_{a_{\min}} < E_{c_2}$ , при котором лампа в течение части периода работает в режиме возврата (РВ) и поэтому ток  $I_{c_2}$  соизмерим с током  $I_a$ .

Из приведенных данных следует, что с энергетической точки зрения наиболее предпочтительным режимом является критический, в котором анодный ток достигает максимального значения при относительно небольших значениях тока экранирующей сетки. При этом напряжение на колебательном контуре будет также максимальным. Следует подчеркнуть, что реализовать критический режим в полной мере, т. е. достичь максимальных значений  $I_{a_1}$ ,  $\gamma_1$  и  $U_{R_m}$ , можно только используя в качестве анодного нагрузочного сопротивления резонирующий колебательный контур. При этом, во-первых, колебательный контур выделяет из тока, протекающего через него, лишь ту гармонику, на которую он настроен (в усилителе – на первую гармонику), благодаря чему анодное напряжение изменяется по синусоидальному закону независимо от закона изменения анодного тока. Это позволяет работать в режимах управления с отсечкой катодного тока и достигать максимальных значений  $I_{a_1}$  и  $\gamma_1$ . Во-вторых, постоянная составляющая анодного тока создает на колебательном контуре пренебрежимо малое падение напряжения, благодаря чему амплитуда переменного напряжения на нём может достигать значений, близких к постоянному напряжению источника питания ( $U_{R_m} \approx E_a$ ), или даже превосходить  $E_a$  вследствие того, что запасенная в колебательном контуре электромагнитная энергия поддерживает в нём колебания и в отрицательный полупериод управляющего напряжения, когда ток через преобразующее устройство не проходит.

Различие свойств резонирующего колебательного контура и резистора наглядно проиллюстрировано на рис. 3.3, где на фоне анодных статических

характеристик пентода изображены электрические характеристики активных сопротивлений резистора  $R$  и колебательного контура  $R_3$ . Уравнение этих характеристик имеет вид  $i_a = (E_a - u_a)/R_a$  и описывает прямую линию, наклоненную к оси  $u_a$  под углом  $\alpha = \arctg(1/R_a)$ . В статическом режиме, когда на управляющую сетку подано только напряжение смещения ( $U_{c_1}'$  или  $U_{c_1}''$ ) и анодный ток  $i_a = I_{a_0}$ , это уравнение для резистора ( $R_a = R$ ) примет вид  $I_{a_0}' = (E_a - U_{a_0})/R$ , для колебательного контура ( $R_a = R_3$ ) –  $I_{a_0}'' = E_a / R_3$ .

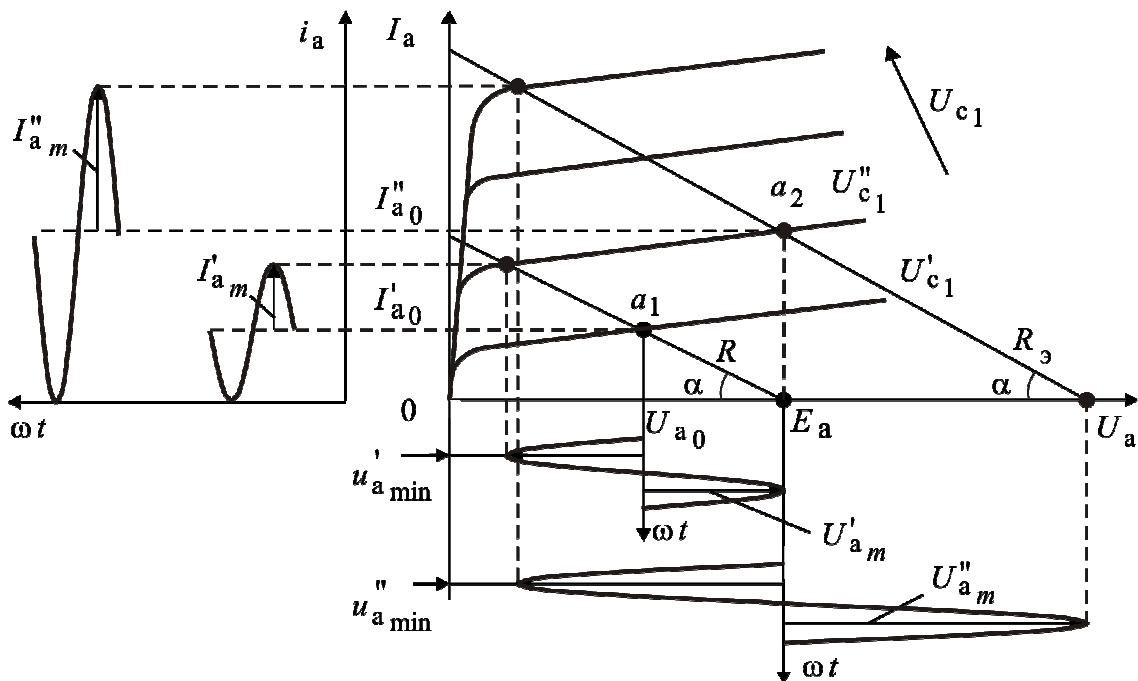


Рис. 3.3

Данные соотношения определяют координаты точек  $a_1$  и  $a_2$ , через которые проходят прямые  $R$  и  $R_3$ . На рис. 3.3  $R = R_3$ , и потому прямые параллельны друг другу. Точки пересечения этих прямых со статическими характеристиками связывают между собой все основные величины электрического режима:  $u_{c_1}$ ,  $i_a$ ,  $u_a$ , и потому они называются *рабочими точками*. Линия, соединяющая все рабочие точки при заданных значениях  $R$  и  $R_3$ , называется *анодной рабочей характеристикой*. Она показывает предельно возможные диапазоны изменений тока  $I_a$  и напряжения  $U_a$  в случае критического режима.

Сравнив максимальные значения амплитуд анодного напряжения при различных типах анодной нагрузки, можно сделать вывод о том, что в режиме колебаний 1-го рода в случае резистора  $U_{a_m} = U_{R_m} < 0.5E_a$ , а при включении колебательного контура  $U_{a_m}'' < E_a$ . Это позволяет значительно увеличить колебательную мощность и КПД преобразующего устройства.

### 3.2. Схема измерительной установки

Электрическая схема, изложенная на рис. 3.4, включает в себя пентод, источники питания анодной цепи  $E_a$  и цепи экранной сетки  $E_{c2}$ , источник смещения в цепи управляющей сетки (ГН – генератор напряжения) и измерители постоянных составляющих анодного  $I_a$  и экранного  $I_{c2}$  токов. В

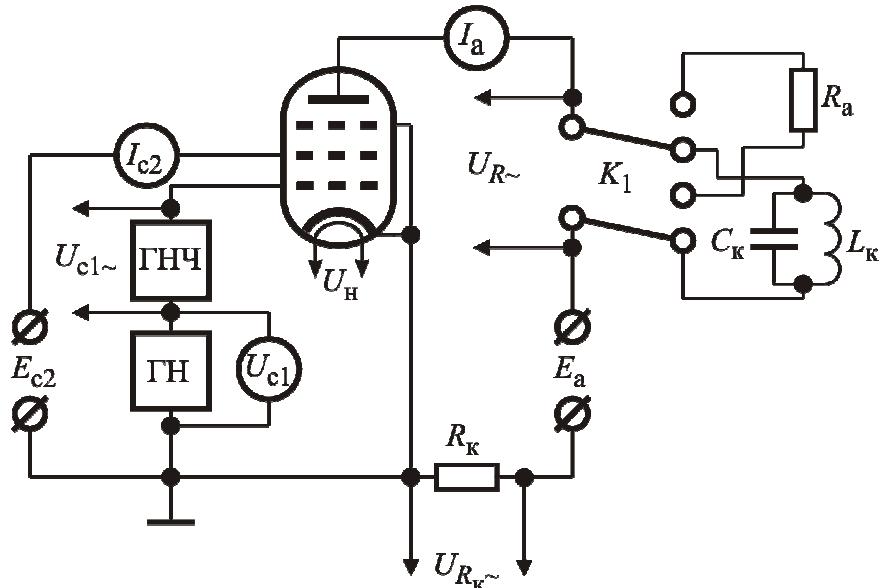


Рис. 3.4

цепь управляющей сетки включен ГНЧ. С помощью ключа  $K_1$  в анодную цепь лампы включается либо колебательный контур, состоящий из емкости  $C_k$  и индуктивности  $L_k$ , либо диссипативное сопротивление  $R_a$ , равное эквивалентному сопротивлению колебательного контура  $R_{30}$  на его резонансной частоте. Соединённое с катодом сопротивление  $R_k$  позволяет определять значение и контролировать форму анодного тока с помощью осциллографа. Переменное напряжение  $U_{c1\sim}$  в цепи управляющей сетки измеряется также с помощью осциллографа.

### 3.3. Порядок выполнения работы

1. Выписать из справочника [4] данные, относящиеся к исследуемой электронной лампе.

2. Установить необходимые значения напряжений источника анодного питания  $E_a$ , экранной сетки  $U_{c_2}$  (для пентода 6Ж2П  $E_a = 120$  В,  $U_{c_2} = 100$  В), включив соответствующие источники. Включить источник постоянного сеточного смещения ГН и установить (предварительно) его выходное напряжение равным 2 В (при этом на управляющую сетку пентода подаётся потенциал -2 В). Включить источник напряжения накала и имеющиеся измерительные приборы – осциллограф и мультиметр.

2. Определить эквивалентное сопротивление  $R_{\vartheta_0}$ , добротность  $Q$  и индуктивность  $L_k$  колебательного контура, включенного в анодную цепь, в режиме колебаний 1-го рода. Для этого, подключив осциллограф к сопротивлению  $R_k$ , ток через которое равен анодному, установить режим колебаний 1-го рода (экранирующую оплётку кабеля осциллографа при всех измерениях следует подключать к гнезду макета, маркованному символом  $\perp$  – общей точке схемы). Данному режиму соответствуют неискажённый синусоидальный ток анода и, соответственно, неискажённое синусоидальное падение напряжения на  $R_k$ . Устанавливается такой режим небольшими попеременными увеличениями переменного сеточного напряжения  $U_{c_1\sim}$  и последующими подстройками постоянного  $U_{c_1}$  с помощью ГН в случае появления искажений напряжения на  $R_k$ . При достижении предельного значения неискажённого напряжения, когда котором любое изменение постоянного или переменного сеточного напряжения ведёт к искажению напряжения на  $R_k$ , зафиксировать в протоколе данные  $U_{c_1\sim}$  и  $U_{c_1}$ . Затем подключить осциллограф к гнёздам  $U_{R\sim}$  и установить  $K_1$  в положение, при котором анодной нагрузкой является колебательный контур. Изменяя частоту ГНЧ, получить максимальное значение напряжения на колебательном контуре  $U_{R\sim}$ , что соответствует настройке ГНЧ на резонансную частоту колебательного контура  $f_0$ . Проверить форму колебаний на сопротивлении  $R_k$  (если возникли искажения синусоидального напряжения – несколько уменьшить  $U_{c_1\sim}$ ) и изме-

рить амплитуду переменного напряжения  $U_{R_{k_m}}$  на сопротивлении  $R_k$ . Далее, подключив осциллограф к колебательному контуру (гнёздам  $U_{R_{\sim}}$ ), измерить амплитуду переменного напряжения  $U_{R_m}$ . Следует помнить, что напряжения поступают на гнёзда  $U_{R_{\sim}}$  макета для их измерения с помощью осциллографа через делитель напряжения 1:10.

Зная значения сопротивления  $R_k$ , амплитуд напряжений  $U_{R_{k_m}}$  и  $U_{R_m}$ , определить эквивалентное сопротивление колебательного контура по формуле  $R_{\vartheta_0} = R_k U_{R_m} / U_{R_{k_m}}$  (из равенства тока через колебательный контур и сопротивление  $R_k$ ).

Изменяя частоту генератора сигналов поочерёдно в сторону увеличения и в сторону уменьшения частоты колебаний, определить частоты  $f_2$  и  $f_1$ , при которых уровень выходного напряжения на колебательном контуре  $U_{R_m}$  составит 0.707 от его максимального значения при резонансе.

Определить характеристическое сопротивление  $\rho \approx R_{\vartheta_0} / Q$  (справедливо для  $Q \geq 10$ ) и добротность колебательного контура  $Q = \frac{f_0}{f_2 - f_1}$ . Зная значения  $\rho$  и  $f_0$ , определить индуктивность  $L_k$  и емкость  $C_k$  колебательного контура, учитывая, что на резонансной частоте контура реактивные сопротивления конденсатора и индуктивности равны и  $\rho = \sqrt{L/C}$ .

3. Снять амплитудную характеристику преобразующего устройства на пентоде в режиме колебаний 2-го рода класса В при включении в анодную цепь колебательного контура. Для этого необходимо установить на управляющей сетке напряжение постоянного смещения  $U_{c_1}$ , равное напряжению запирания лампы ( $U_{c_1} = U_{c_{1\text{зап}}}$ ), что соответствует режиму класса В. Уточнить напряжение смещения, наблюдая форму импульсов анодного тока на сопротивлении  $R_k$  с помощью осциллографа. Для класса В длительность импульсов анодного тока  $\tau_a$  (синусоидальных однополярных импульсов напряжения на сопротивлении  $R_k$ ) должна составлять половину периода колебаний, как показано для недонапряжённого режима на рис. 3.5, а. Постепенно увеличивая переменное напряжение на управляющей сетке  $U_{c_1\sim}$  с помощью ГНЧ,

добиться перехода в перенапряжённый режим (рис. 3.5, *в*). При необходимости, изменяя частоту генератора сигналов в небольших пределах, добиться симметричной формы импульсов анодного тока (рис. 3.5, *в*), что соответствует более точной настройке на резонансную частоту контура. Уменьшить

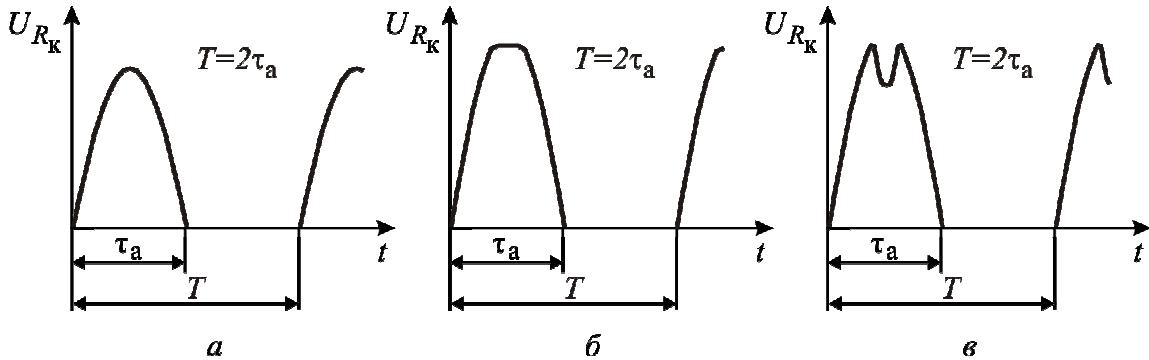


Рис. 3.5

$U_{c_1 \sim}$  до перехода в критический режим (рис. 3.5, *б*). Измерить  $U_{c_1 \sim}$  и  $U_{R_m}$ , подключая осциллограф попарно к гнёздам «Вых. ГНЧ» и  $U_{R_\sim}$ . Также измерить постоянные составляющие анодного  $I_{a_0}$  и экранного  $I_{c_2}$  токов, подключая мультиметр к гнёздам  $I_a$  и  $I_{c_2}$  макета. Мультиметр должен быть переведён в режим измерения постоянных напряжений. Токи, как уже отмечалось, определяются по падениям напряжений на резисторах сопротивлением 10 Ом, включённых между упомянутыми парами гнёзд. Зафиксировать значение постоянного напряжения на управляемой сетке  $U_{c_1}$ , при котором производятся измерения. Это напряжение должно оставаться неизменным для всех последующих измерений с колебательной нагрузкой.

Повторить измерения для четырёх других переменных составляющих сеточных напряжений для получения зависимостей  $U_{R_m}$ ,  $I_{a_0}$  и  $I_{c_2}$  от амплитуды напряжения на управляемой сетке  $U_{c_{1m}}$ . Амплитуды  $U_{c_{1m}}$  должны соответствовать недонапряжённому и перенапряжённому режимам (по два значения для каждого режима). Рекомендуется для недонапряжённого режима устанавливать половину и четверть от переменного напряжения сетки, соответствующего критическому режиму; для перенапряжённого – максимальное напряжение ГНЧ (для данных макетов максимальная амплитуда напряжения ГНЧ  $U_{c_{1m}}$  составляет 4 В) и среднее арифметическое от максимально-го напряжения ГНЧ и переменного напряжения, соответствующего критическому режиму. (Предлагаемые значения – ориентировочные.)

Значения измеряемых величин занести в таблицу. Зарисовать осцилограммы анодного тока и напряжения на анодной нагрузке, соответствующие трём режимам распределения энергии.

4. Исследовать особенности процесса преобразования энергии электронного потока в режиме колебаний 1-го рода при диссипативной (резистивной) нагрузке в анодной цепи и при включении в нее колебательного контура. Для этого необходимо включить в анодную цепь диссипативное сопротивление  $R_a$ , равное по значению эквивалентному сопротивлению колебательного контура  $R_{\Theta_0}$ . Возможное отличие сопротивления резистора от эквивалентного сопротивления колебательного контура не должно превышать 20 %. Для подключения выбранного резистора используются гнёзда  $R_a$  на поле «Пентод» лабораторного макета. После установки резистора необходимо установить переключатель К1 в положение, соответствующее резистивной нагрузке в анодной цепи (рис. 1.1).

Установить необходимые значения напряжений источника анодного питания  $E_a$  и экранной сетки  $U_{c_2}$  (см. п. 2). Подать на управляющую сетку напряжение смещения, соответствующее режиму колебаний 1-го рода, для чего, подключив осциллограф к сопротивлению  $R_k$  для контроля амплитуды и формы анодного тока и увеличивая напряжение сигнала  $U_{c_{1m}}$ , добиться наибольших неискажённых синусоидальных колебаний. При этом можно в небольших пределах изменять напряжение смещения  $U_{c_{10}}$ , чтобы ликвидировать ограничение анодного тока. Добившись требуемого результата, зафиксировать значение  $U_{c_{10}}$ , которое должно оставаться неизменным в процессе всех измерений для резистивной нагрузки.

С помощью осциллографа измерить амплитуду переменного напряжения на управляющей сетке  $U_{c_{1m}}$  и  $U_{R_m}$  на анодной нагрузке – сопротивлении  $R_a$ . Измерить постоянные составляющие анодного  $I_{a_0}$  и экранного  $I_{c_2}$  токов, подключая мультиметр к гнёздам  $I_a$  и  $I_{c_2}$  макета. Мультиметр должен быть переведён в режим измерения постоянных напряжений. Токи определяются по падениям напряжений на резисторах сопротивлением 10 Ом, включённых между упомянутыми парами гнёзд. Результаты измерений занести в таблицу.

Повторить измерения для четырёх других переменных составляющих сеточных напряжений для получения зависимостей  $U_{R_m}$ ,  $I_{a_0}$  и  $I_{c_2}$  от амплитуды напряжения на управляющей сетке  $U_{c_{1m}}$ . Амплитуды  $U_{c_{1m}}$ , при которых выполняются оставшиеся измерения, могут быть получены делением первого использованного значения сеточного напряжения  $U_{c_{1m}}$  на 2 и на

4. Два других значения – максимальное напряжение ГНЧ (для данных макетов максимальная амплитуда напряжения ГНЧ, равная  $U_{c_{1m}}$ , составляет 4 В), и среднее арифметическое от максимального напряжения ГНЧ и первого использованного значения сеточного переменного напряжения. (Предлагаемые значения – ориентировочные.)

Значение измеряемых величин занести в таблицу. Зарисовать осциллографмы напряжений на анодной нагрузке усилителя для каждого из исследованных режимов.

### 3.4 Содержание отчёта

Отчёт должен содержать:

1. Цель работы.
2. Тип и справочные данные исследуемого вакуумного электронного прибора.
3. Схему измерительной установки.
4. Результаты измерений напряжений и частот для измерения параметров нагрузочного колебательного контура.
5. Расчётные формулы и вычисления добротности, эквивалентного и характеристического сопротивлений, ёмкости и индуктивности колебательного контура.
6. Результаты измерений  $U_{R_m}$ ,  $I_{a_0}$ ,  $I_{c_2}$  от амплитуды напряжения на управляющей сетке  $U_{c_{1m}}$  для колебательной и резистивной нагрузок в виде соответствующих таблиц и графиков.
7. Расчётные формулы с примерами подстановки исходных данных и результаты вычислений  $P_\sim$ ,  $P_a$ ,  $P_0$ ,  $\eta$ ,  $\gamma$ ,  $\xi$  в виде соответствующих таблиц и графиков.
8. Выводы.

### **3.5. Контрольные вопросы и задания**

1. Опишите работу простейшего преобразующего устройства.
2. Назовите основные параметры, характеризующие работу электронного преобразующего устройства. От чего они зависят?
3. Почему при реализации преобразующих устройств предпочтение отдается пентодам и лучевым тетродам, а не триодам?
4. Чем различаются режимы преобразования энергии электронного потока в лампах? Поясните особенности режимов преобразования с помощью их графического изображения.
5. Поясните особенности преобразования энергии электронного потока при работе лампы в режиме колебаний 1-го рода с диссиPATивной нагрузкой в анодной цепи.
6. Поясните особенности преобразования энергии электронного потока при работе лампы в режиме колебаний 2-го рода с нагрузкой в виде колебательного контура в анодной цепи.

### **Список литературы**

1. Сушков А. Д. Вакуумная электроника: учеб. пособие. СПб.: Лань, 2004.
2. Исследование процессов модуляции и преобразования энергии электронных потоков в электронных приборах: метод. указ. к лаб. раб. по дисц. «Вакуумная и плазменная электроника» / сост.: В. А. Мес, А. Д. Сушков. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2000.
3. Иванов Б. В., Тупицын А. Д., Шануренко А. К. Применение характеристиографа для исследования вакуумных и твердотельных приборов: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПб ГЭТУ «ЛЭТИ», 2011.
4. Электровакуумные приборы: Справочник. М.: Энергоиздат, 1976.

## **СОДЕРЖАНИЕ**

Введение.....	3
1. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО МАКЕТА .....	4
2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА МОДУЛЯЦИИ ЭЛЕКТРОННЫХ ПОТОКОВ В ВАКУУМНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРАХ (ВЭПУ) .....	7
2.1. Основные понятия, термины и определения .....	7
2.2. Схема измерительной установки.....	11
2.3. Порядок выполнения работы.....	11
2.4. Содержание отчёта.....	14
2.5. Контрольные вопросы.....	14
3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОННО- ГО ПОТОКА В ЛАМПОВЫХ УСИЛИТЕЛЯХ.....	14
3.1. Основные понятия, термины и определения.....	15
3.2. Схема измерительной установки.....	20
3.3. Порядок выполнения работы.....	20
3.4. Содержание отчёта.....	25
3.5. Контрольные вопросы и задания.....	25
Список литературы .....	26

Редактор И. Б. Синишева

---

Подписано к печати 20.05.13. Формат 60×84  $\frac{1}{16}$ . Бумага офсетная.  
Печать офсетная. Печ. л. 1,75.  
Тираж 90 экз. Заказ 60.

---

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