

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И  
Лобачевского»

Отчёт по лабораторной работе  
«Исследование электронных ламп диода и триода»

Выполнили студенты группы 10191

Елясин Андрей Алексеевич  
Петрова Ирина Александровна

Проверил: Водопьянов Александр Валентинович

Нижний Новгород

**Цель работы:** изучить устройство вакуумного диода и триода, снять их характеристики и определить основные параметры усилителя электрических сигналов на триоде

**Оборудование:** диод, триод, вольтметр, миллиамперметр, генератор, осциллограф

## I. Теоретическая часть

Диод состоит из баллона (стеклянного, металлостеклянного, керамического), в котором создается вакуум, и системы плоских или цилиндрических электродов: анода и катода. Катод - (в простейшем случае) накаливаемая вольфрамовая нить, излучающая электроны при достаточно высокой температуре (термоэлектронная эмиссия).

Применяют чаще катоды с косвенным подогревом – электроны излучает эмиттер, электрически изолированный от вольфрамового подогревателя. Преимущество таких катодов возможности питания подогревателя переменным током и эквипотенциальность эмиттера. Эмиттеры покрываются оксидной пленкой из материалов, имеющих малую работу выхода электронов, что дает хорошую эмиссию при сравнительно небольшом подогреве.

Если соединить анод с катодом через гальванометр, можно обнаружить в цепи анодный ток. Он достаточно мал, потому что вылетевшие из катода электроны создают вокруг него отрицательный пространственный заряд, который преодолеть могут только электроны с большой кинетической энергией, остальные возвращаются на катод.

Анодный ток можно увеличить, скомпенсировав действие пространственного заряда. Это можно сделать, создав между анодом и катодом электрическое поле, которое ускоряло бы электроны. Для этого включают источник постоянного напряжения  $E_a$ , а в цепь катода – источник накала  $E_k$  (см. Рис.1).

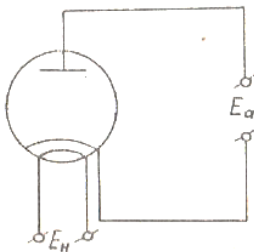


Рис. 1

Чем больше  $E_a$ , тем больше анодный ток. При некотором напряжении пространственного заряда не будет, все излучаемые электроны достигнут анода, дальнейшее увеличение напряжения не увеличит ток (режим насыщения).

У электронных ламп с оксидным катодом насыщения анодного тока нет вплоть до полей, разрушающих катод (Рис.2, пунктир). Если изменить полярность анодного источника (т.е. подключить его минусом к аноду, а плюсом к катоду), то ток протекать через лампу не будет. Поэтому диод обладает односторонней проводимостью. (Можно использовать для выпрямителей переменного тока детекторов в радиоприемниках и т.п.)

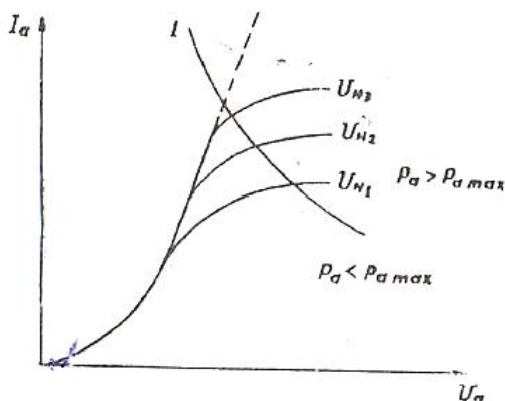


Рис. 2

При постоянной температуре катода  $T = \text{const}$ , величина анодного тока диода зависит только от анодного напряжения. Анодная характеристика лампы – функция, выражающая зависимость анодного тока от анодного напряжения. Семейство анодных характеристик диода приведено на Рис.2.

Ток насыщения пропорционален количеству электронов, излученных катодом, и при различных температурах он будет тем больше, чем больше напряжение накала. При прохождении тока через диод в нем будет рассеиваться определенная электрическая мощность. Электроны, излученные катодом, увеличивают свою кинетическую энергию за счет энергии электрического поля. При ударе об анод электрон отдает ему свою энергию. Энергия электронов выделяется на аноде в виде тепловой энергии и излучается им в окружающее пространство. С повышением анодного напряжения увеличивается количество достигших анода электронов, их скорость и кинетическая энергия, и, следовательно, возрастает и мощность, рассеиваемая анодом.

Для каждого типа лампы существует максимальная допустимая величина этой мощности -  $P_{a \max}$ . Превышение этой мощности может вывести лампу из строя. Рассчитывается по формуле:

$$P_a = U_a I_a$$

Уравнение  $P_{a \max} = U_a I_a = \text{const}$  изображается гиперболой, асимптоты – координатные оси (см. Рис.2, отмечено индексом «1»).

Температурная характеристика диода – это функция, выражающая зависимость анодного тока диода от величины напряжения накала:

$$I_a = f(U_k)$$

По ней можно судить об эмиссионной способности катода, о возникновении и исчезновении пространственного заряда между катодом и анодом лампы. Для каждой лампы есть максимальное напряжение накала, которое нельзя превышать.

Представление о работе диода можно составить и не зная его характеристик, если известны его параметры:

- Крутизна вольт-амперной характеристики:  $S = \frac{dI_a}{dU_a}$
- Или внутренне сопротивление  $R_i = \frac{1}{S}$

Характеристика диода нелинейна, поэтому дифференциальные параметры зависят от значений  $I_a$  и  $U_a$ :

$$S = f(U_a).$$

Приближенное значение крутизны можно определить по вольтамперной характеристике, заменив дифференциалы на малые приращения так, чтобы в этих пределах участок анодной характеристики можно было считать линейным:

$$S \approx \frac{\Delta I_a}{\Delta U_a}.$$

Триод состоит из баллона с вакуумом и трёх электродов: анода, катода и сетки (расположена ближе к катоду). Изменение потенциала сетки по отношению к катоду изменяет величину электрического поля между ними.

При потенциале сетки  $U_c > 0$  (относительно катода) электрическое поле ускоряет электроны и увеличивает  $I_a$ , а при  $U_c < 0$  (относительно катода) электрическое поле замедляет электроны и уменьшает  $I_a$ . Следовательно, наличие сетки в лампе позволяет управлять величиной анодного тока. Обычно используют тормозящее действие сетки, т.к. при этом сеточный ток отсутствует (ток, возникающий при ускоряющем режиме сетки, когда часть электронов притягивается к положительно заряженной сетке.) и в цепи для управления анодным током не затрачивается никакой мощности.

Анодный ток в триоде зависит и от напряжения на сетке и от напряжения на аноде:  $I_a = f(U_c, U_a)$ .

При постоянной температуре катода  $T = const$  эта зависимость изображается в виде двух семейств статических характеристик, когда одно или другое напряжение считается постоянным. Статистические анодно-сеточные характеристики см. на Рис.3:

$$I_a = f_1(U_c)_{U_a = const}$$

и статистические анодные характеристики – на Рис.4:

$$I_a = f_2(U_a)_{U_c = const}$$

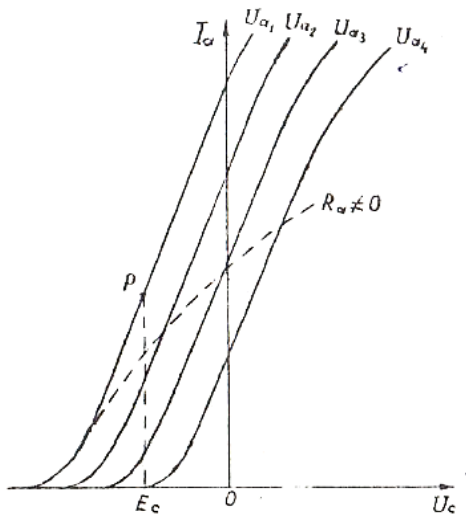


Рис. 3

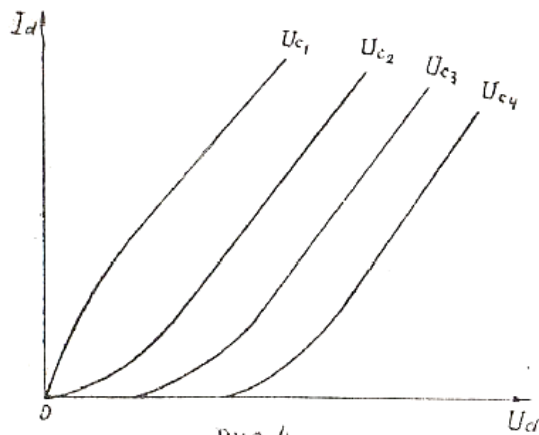


Рис. 4

При увеличении  $U_a$  анодно-сеточные характеристики смещаются влево. То же происходит с анодными характеристиками при увеличении  $U_c$ .

Параметры:

- $S = \frac{\partial I_a}{\partial U_c} = \left[ \frac{dI_a}{dU_c} \right]_{U_a = const}$  – крутизна триода;
- $R_i = \frac{\partial U_a}{\partial I_a} = \left[ \frac{dU_a}{dI_a} \right]_{U_c = const}$  – внутреннее сопротивление триода.

Крутизна характеристики графически может быть определена как тангенс угла наклона касательной к сеточной характеристике в данной точке. Из-за нелинейности сеточной характеристики значение крутизны в каждой точке характеристики различно.

Внутреннее сопротивление графически может быть определено как котангенс угла наклона касательной к анодной характеристике в рабочей точке.

Параметры  $S$  и  $R_i$  изменяются в зависимости от действующих напряжений на электродах триода. Найдём связь между этими параметрами:

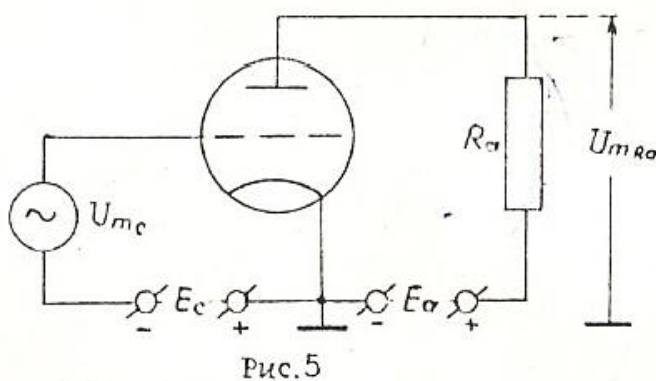
$$dI_a = \frac{\partial I_a}{\partial U_c} dU_c + \frac{\partial I_a}{\partial U_a} dU_a$$

Если  $U_c$  и  $U_a$  изменять так, чтобы анодный ток  $I_a$  оставался постоянным, то учитывая, что изменения сеточного и анодного напряжения при этом различного знака, получим:

$$0 = \frac{\partial I_a}{\partial U_c} - \frac{\partial I_a}{\partial U_a} \left[ \frac{dU_a}{dU_c} \right]_{I_a = const} \quad \text{или} \quad S = \frac{1}{R_i} \mu, \quad \mu = \left[ \frac{dU_a}{dU_c} \right]_{I_a = const}$$

- $\mu$  – статистический коэффициент усиления, показывает, во сколько раз действие на анодный ток приращения  $U_c$  эффективнее действия такого же приращения  $U_a$ .
- $D = \frac{1}{\mu}$  – проницаемость лампы. Соотношение  $SR_i D = 1$ , где по двум известным параметрам можно найти третий, справедливо и для более сложных электронных ламп с большим количеством электродов.

Из-за того, что сетка расположена гораздо ближе к катоду, чем анод, управляющее действие её на поток электронов сильнее. Если между сеткой и катодом приложено переменное напряжение, а в анодную цепь лампы включено сопротивление, то анодный ток будет меняться, следуя за изменением напряжения на сетке. Изменение анодного тока приводит к изменению напряжения на сопротивлении в анодной цепи. Следовательно, меняя напряжение на сетке, можно управлять мощностью, выделяемой в анодной цепи, не расходуя никакой энергии в сеточной цепи (если мгновенное значение сеточного напряжения всегда отрицательно). Источником энергии при этом является анодная батарея. Это свойство триода позволяет использовать его для усиления и для генерации электрических колебаний. Упрощенная схема усилительного каскада приведена на Рис.5.



Источник  $E_c$  носит название источника сеточного смещения и служит для задания рабочей точки на анодно-сеточной характеристике (точка P на Рис.3).

Анодно-сеточная характеристика при  $R_a \neq 0$  будет отличаться от статической анодно-сеточной характеристики, т.к. при изменении будет меняться напряжение на аноде лампы ( $U_a = E_a - I_a R_a$ ). Такая характеристика, называемая динамической, показана на Рис.3 пунктиром.

Как и в статическом режиме, управляющее действие сетки при работе лампы с нагрузкой характеризуется крутизной:

$$S_k = \frac{dI_a}{dU_c}$$

В отличие от статической, эта крутизна определяется при изменяющемся напряжении на аноде. Связь статической крутизны с динамической:

$$S_k = \frac{S}{1 + \frac{R_a}{R_i}}$$

Усиление сигнала, обеспечиваемого лампой, характеризуется динамическим коэффициентом усиления  $K$ , равным отношению амплитуды переменного напряжения на сопротивлении нагрузки к амплитуде напряжения на сетке:

$$K = \frac{U_{mR_n}}{U_{m_c}}$$

Выразим его через статические параметры лампы:  $K = \frac{dU_{R_n}}{dU_c}$  – заменили амплитуды б.м. приращениями, что допустимо в линейном режиме.

Учтем, что  $dU_{R_n} = R_n dI_a$ , получим:  $K = \frac{R_n dI_a}{dU_c} = R_n S_{\kappa} = \frac{R_n S}{1 - \frac{R_n}{R_i}} = \frac{\mu}{1 - \frac{R_n}{R_i}}$ .

## II. Экспериментальная часть

### 1) Снятие статистической характеристики диода

Подключили к соответствующим клеммам на установке вольтметр и миллиамперметр и подали напряжение на лампу. Изменяя величину  $U_a$ , для каждого его конкретного значения считывали величину  $I_a$ , результаты занесли в таблицу 1. По полученным данным построили соответствующую характеристику (см. Рис.6)

$U_a, \text{В}$	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
$I_a, \text{мА}$	3,62	9,29	15,74	21,25	31,16	39,3	47,9	60,18	71,36	83	90,4

Таблица 1. Экспериментальные данные ВАХ диода.

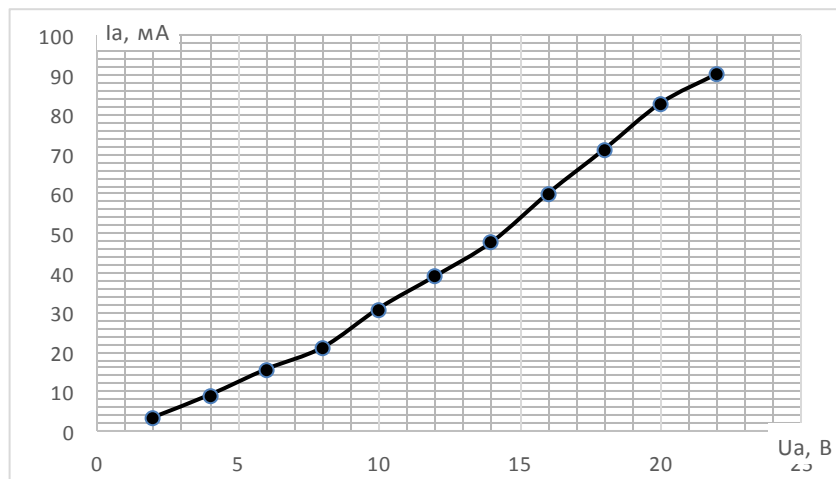


Рис. 6. Экспериментальный ВАХ диода

Перед снятием характеристик выяснили предельные значения для данной лампы:  $P_{a \max} = U_a I_a = 2,5 \text{ Вт}$ , результаты занесли в таблицу 2.

$U_a, \text{В}$	60	80	100	120	140	160	180	200	220
$I_a, \text{мА}$	41,67	31,25	25	20,83	17,89	15,63	13,89	12,5	11,33

Таблица 2. Предельные значения напряжения на диоде и тока в нём.

Далее при фиксированном анодном значении сняли семейство сеточных характеристик, см. Таблица 3 и Рис.7

Вычислили крутизну в нескольких точках характеристики по формуле

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_a}$$

$$S_{12-14} = \frac{47,9 - 39,3}{2} = 4,3 \text{ мОм}^{-1}$$

$$S_{10-12} = \frac{39,3 - 31,16}{2} = 4,07 \text{ мОм}^{-1}$$

$$S_{14-16} = \frac{60,18 - 47,9}{2} = 6,14 \text{ мОм}^{-1}$$

### 2) Снятие статических характеристик триода

$U_a = 60\text{В}$	$U_c, \text{В}$	-2,9	-2,4	-2,1	-1,5	-1	-0,5	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5
	$I_{a, \text{мА}}$	0,55	1	1,5	2,5	3,7	4,8	6	7,4	8,5	9,8	11	12,3	13,8	15	16,5	17,9
$U_a = 80\text{В}$	$U_c, \text{В}$	-3	-2,5	-2	-1,5	-1	-0,5	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5
	$I_{a, \text{мА}}$	1,5	2,5	3	4,7	5,8	7,3	8,6	9,9	11,3	12,6	14	15,6	16,3	18,6	19,4	21,5
$U_a = 100\text{В}$	$U_c, \text{В}$	-2,8	-2,5	-2	-1,5	-1	-0,5	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5
	$I_{a, \text{мА}}$	3,7	4,4	5,6	5,9	8,2	9,6	11,4	12,8	14,4	15,7	17,5	18,8	20,5	21,7	23,6	25,3

Таблица 3. Экспериментальные данные для семейства сеточных кривых

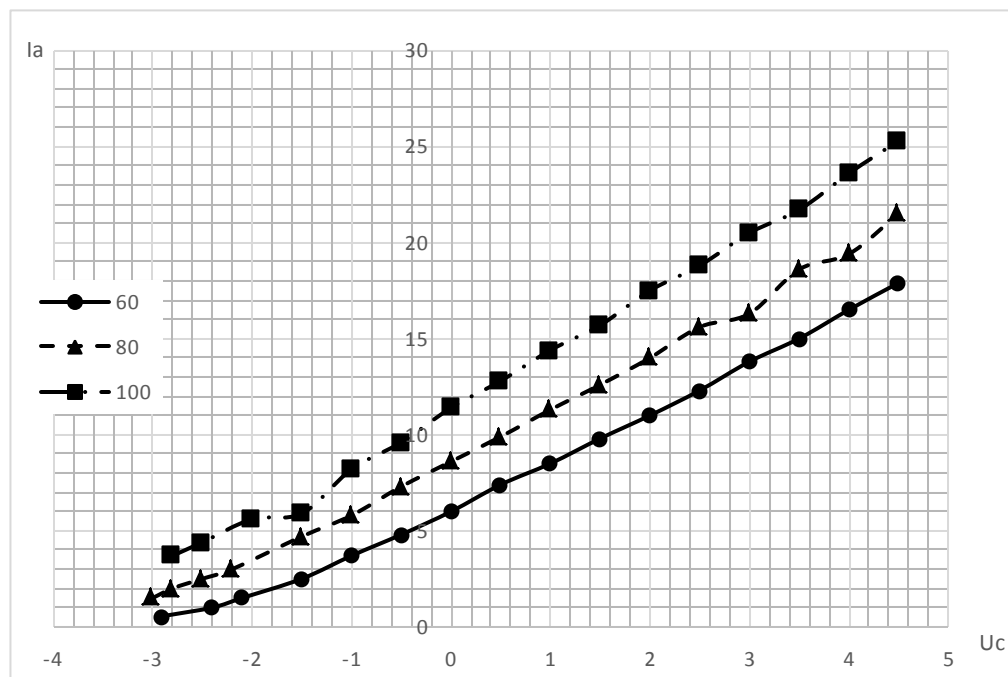


Рис. 7. Семейство сеточных кривых триода

Для средних участков характеристик вычислили крутизну:

При  $U_a = 60\text{В}$

$$S = 3,42 \text{ мОм}^{-1}$$

При  $U_a = 80\text{В}$

$$S = 3,57 \text{ мОм}^{-1}$$

При  $U_a = 100\text{В}$

$$S = 3,35 \text{ мОм}^{-1}$$

Аналогично поступим при фиксированном  $U_c$ , см. Таблица 4 и Рис.8

$U_c = 2B$	$U_a, B$	2	4	6	8	10	15	20	25	30	-	-	-	-	-	-	-	-
	$I_{a,M} A$	3,2	3,3	3,6	3,9	4,3	4,9	5,7	6,4	7								
$U_c = 0$	$U_a, B$	2	6	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
	$I_{a,M} A$	0,46	0,8	1,1	1,9	2,8	3,8	4,9	6	7,3	8,6	9,9	11,3	12,7	14,3	15,8	17,5	19,1
$U_c = -2B$	$U_a, B$	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	-	-	-
	$I_{a,M} A$	0,42	1	1,7	2,5	3,5	4,5	5,6	6,8	8	9,4	10,7	12,2	13,6	15,2			
$U_c = -4B$	$U_a, B$	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	-	-	-	-	-
	$I_{a,M} A$	0,48	0,9	1,6	2,4	3,2	4,2	5,3	6,4	7,6	8,9	10,2	11,6					

Таблица 4. Экспериментальные данные для семейства анодных кривых

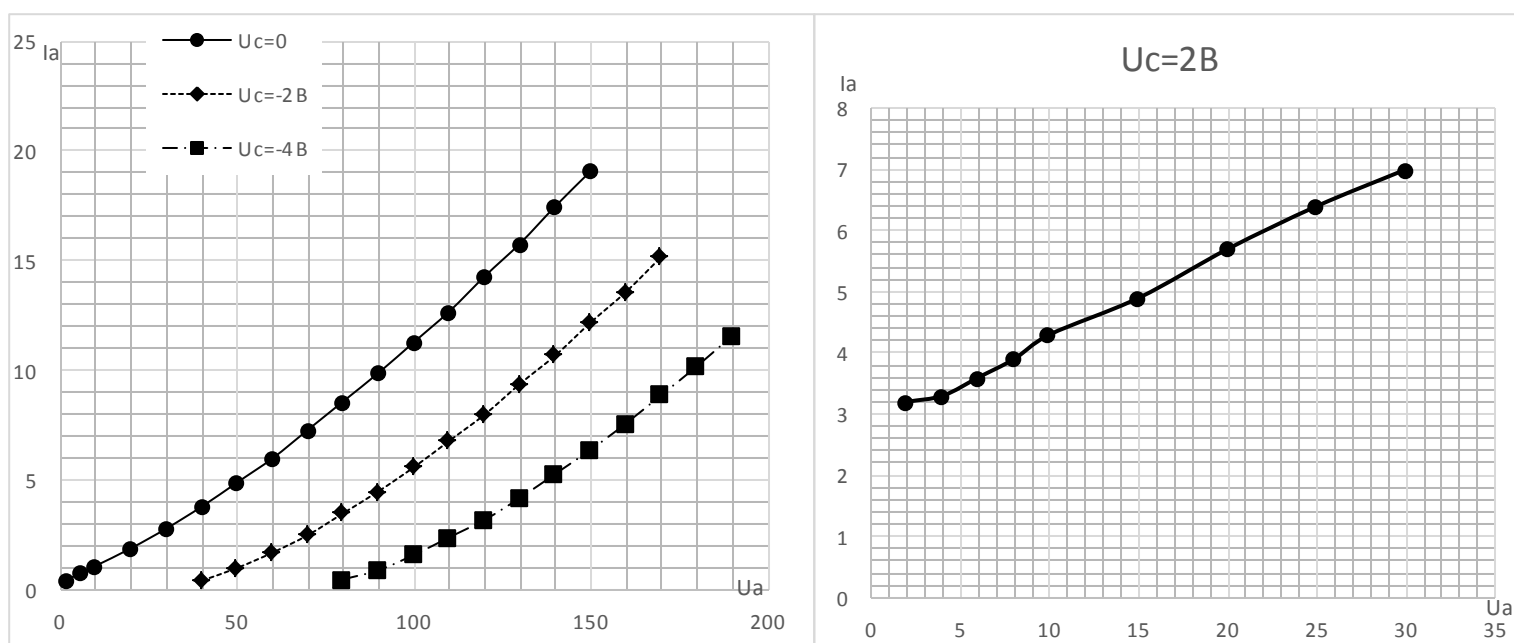


Рис. 8. Семейство анодных кривых триода

Для средних участков характеристик вычислили внутреннее сопротивление и статический коэффициент усиления:

$$U_c = 2B, R_i = 7292 \text{ Ом},$$

$$U_c = 0, R_i = 7692 \text{ Ом},$$

$$U_c = -2B, R_i = 7738 \text{ Ом},$$

$$U_c = -4B, R_i = 9090 \text{ Ом},$$

Оценим статистический коэффициент при  $U_a = 100B, U_c = -2B$ :  $\mu \approx 25,9$

### 3) Определение коэффициента усиления усилителя

С выхода генератора подали сигнал с частотой  $f \approx 1 \text{ кГц}$  и амплитудой  $\approx 100 \text{ мВ}$ . Далее подключив этот сигнал к гнезду «вход» усилителя, на осциллограф подали сигнал с гнезда «выход».

Определив по осциллограмме амплитуду выходного сигнала, определили величину  $K = 18$ . Чтобы



проверить частотные свойства усилителя, сняли зависимость коэффициента усиления от частоты при  $R = 18\text{кОм}$ , результаты занесли в таблицу 5

$f, \text{кГц}$	23	80	100	200	400	500	600
$K$	16,8	12	10,6	6,6	3,8	2,56	2,2

Таблица 5. Экспериментальные точки для определения зависимости  $K$  от частоты генератора

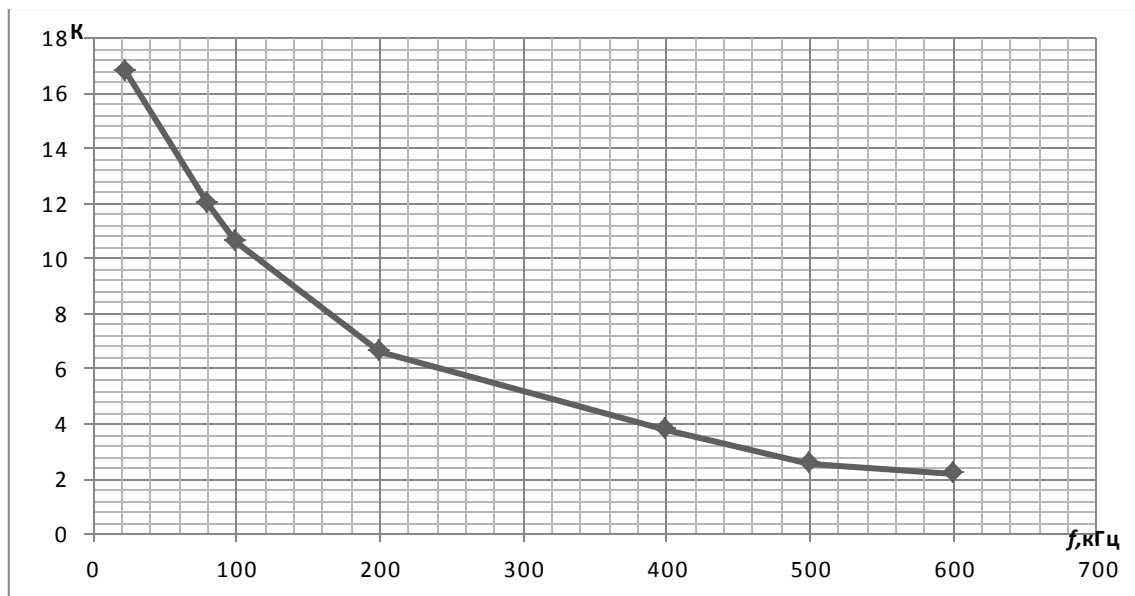


Рис. 9. Экспериментальный график зависимости  $K$  от частоты генератора

Для всех возможных значений сопротивления нагрузки  $R_a$  вычислили  $K$  и сравнили с теоретическим значением (при  $f=1\text{кГц}$ ), чтобы проверить зависимость  $K = \frac{\mu}{1 - \frac{R_f}{R_a}}$  (см. Таблица 6,

Рис.10)

$R_a, \text{кОм}$	0,5	1	3	5	10	12	15	18	200	300	1000
$K$	0,85	1,48	2,62	6	9,8	11,25	16	17,6	18,8	18,4	17,4
$K_m$	1,57	2,98	7,26	10,19	14,63	15,77	17,11	18,14	24,94	25,25	25,7

Таблица 6. Экспериментальный и теоретические точки зависимости  $K$  от  $R_a$

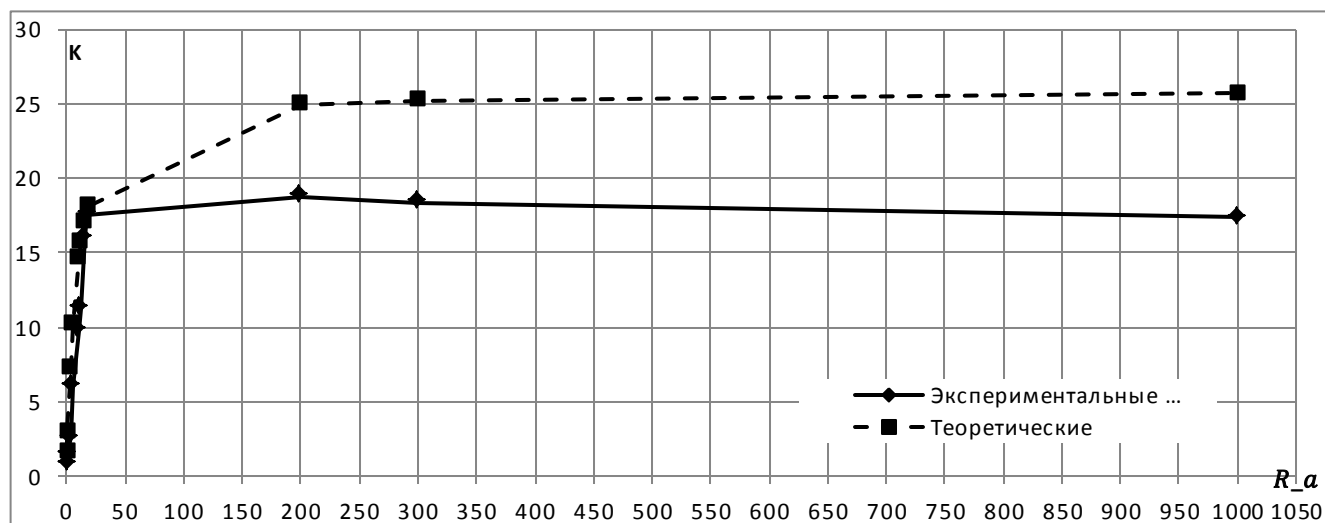


Рис. 10. График зависимости  $K$  от  $R_a$

Судя по графику, зависимость  $K = \frac{\mu}{1 - \frac{R_i}{R_a}}$  действительно выполняется при значениях  $R_a < 200 \text{ кОм}$  с точностью до погрешности, а вот при  $R_a > 200 \text{ кОм}$  экспериментальная кривая начинает убывать, что объясняется смещением рабочей точки – внутреннее сопротивление и статистический коэффициент усиления изменяются.

4) *Объяснить качественно ход анодной характеристики лампы, включенной диодом*

При увеличении напряжения источника всё больше электронов будет способно преодолеть пространственный заряд. При дальнейшем увеличении этого напряжения количество и скорость электронов, долетающих до анода, увеличивается. С конкретным значением напряжения наступит режим насыщения, когда все образовавшиеся электроны достигают анода, дальнейшее увеличение поля приводит к омическим потерям. (Подробнее см. Теоретическая часть)

5) *Пренебрегая начальной скоростью вылета из катода и считая поле между катодом и анодом однородным, а анодное напряжение заданным, найти скорость электронов у поверхности анода и время пролета электроном данного расстояния.*

Обозначим  $U_a$  – анодное напряжение,  $l$  – расстояние между катодом и анодом, тогда из закона сохранения энергии  $\frac{m_e v^2}{2} = eU_a$  ( $e$  – заряд электрона), откуда  $v = \sqrt{\frac{2eU_a}{m_e}}$

Т.к. электрон ускоряется равномерно, время пролета:  $t = \frac{l}{\left(\frac{v}{2}\right)} = \frac{2l}{\sqrt{\frac{2eU_a}{m_e}}} = \sqrt{\frac{2m_e}{U_a e}} l$ .

- 6) *Если сетку оставить никуда не подключенной, то т.к. сетка – проводник, заряды в ней перераспределятся, и сетка практически не будет оказывать влияния на движение электронов, и лампа поведет себя как диод.*
- 7) *Если на сетку подать большой положительный потенциал, а на анод небольшой отрицательный (по отношению к катоду), то, разогнавшись от катода к сетке и преодолев её, электроны начнут тормозить и почти ни один из них не долетит до анода, поэтому тока не будет.*
- 8) *Различие внутреннего сопротивления триода и его сопротивления постоянному току: первое представляет собой омические потери, связанные с ударом об анод (отношение приращения анодного напряжения к вызванному им приращению анодного тока при неизменном сеточном напряжении), внутреннее сопротивление  $R_i$  существенно нелинейно, а сопротивление постоянному току связано с тем, что на сетку подают небольшой отрицательный потенциал относительно катода (определяется, как обычно, по закону Ома:  $R_a = U_a / I_a$ ).*

Сопротивление  $R_a$  не остается постоянным даже при работе на линейных участках характеристик. Особенно сильно влияние на него сеточного напряжения. С увеличением напряжения сетки анодный ток растет, следовательно, значение  $R_a$  уменьшается. При увеличении положительного сеточного напряжения все большее число электронов заполняет пространство между анодом и катодом, проводимость возрастает, а сопротивление уменьшается. С увеличением отрицательного напряжения сетки по абсолютному значению, наоборот, уменьшается число электронов в пространстве анод — катод и значение  $R_a$  возрастает. Запирание лампы соответствует  $R_a = \infty$ .

- 9) С ростом частоты усиливаемого сигнала усилительные свойства триода ухудшаются. Это связано, в основном, с влиянием междueleктродных емкостей и индуктивностей вводов лампы. Особенно сильное влияние на частотные свойства триода оказывает ёмкость между сеткой и анодом, которую называют проходной ёмкостью. Суммарно – конструкцией лампы и рабочей точки.

### Вывод:

- Изучили устройство вакуумного диода и триода, сняли анодные характеристики диода, анодно-сеточные и анодные триода (см.Рис.6-8);
- Выяснили, что при постоянной температуре величина анодного тока зависит только от величины анодного напряжения. Анодная характеристика триода при сеточном напряжении равном нулю есть анодная характеристика диода. При  $U > 0$  электроны между электродами движутся быстро, при  $U < 0$  замедляются, что в процессе эксперимента и было подтверждено.
- Проверили частотные свойства усилителя, сняв зависимость коэффициента усиления от частоты при  $R = 18 \text{ кОм}$ , он уменьшался
- Установили, что зависимость  $K = \frac{\mu}{1 - \frac{R_f}{R_a}}$  подтверждается экспериментально при определенных значениях сопротивления ( $R_a < 200 \text{ кОм}$  )