

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»
(ННГУ)
Высшая школа общей и прикладной физики

Отчет по лабораторной работе №219
«Исследование электронных ламп
диода и триода»

Выполнили:
Студенты 2 курса, ВШОПФ
Зинягин Алексей
Мурзина Полина

2022 г.

Дата допуска: 7.09.22 г.

Дата лабораторной работы: 7.09.22 г.

Дата отчета: 05.10.22 г.

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

Цель работы: разобраться в работе простейших электронных ламп – диода и триода, снять их характеристики и определить основные параметры усилителя электрических сигналов на триоде

Теоретические обоснования.

1. Диод.

Диод состоит из баллона, в котором создается вакуум $\sim 10^{-7}$ мм ртутного столба, и системы плоских или цилиндрических электродов: катода и анода. Распространение получили катоды с косвенным подогревом, где источником электронов является эмиттер, электрически изолированный от вольфрамового подогревателя. Преимуществом таких катодов является возможность питания подогревателя переменным током (вследствие достаточно большой инерционности всей системы) и эквипотенциальность поверхности 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, оставшиеся возвращаются на катод. Чтобы получить большой анодный ток, необходимо скомпенсировать действие пространственного заряда, создав электрическое поле между анодом и катодом, которое бы ускоряло движение электронов. Для этого включают источник постоянного напряжения E_a , а в цепь катода – источник накала E_n (см. рис.1).

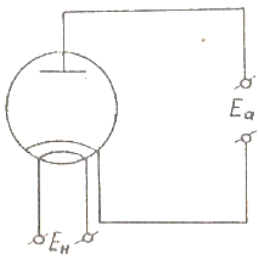


Рис.1

Чем больше напряжение источника 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. Диод обладает односторонней проводимостью, поэтому его можно использовать как выпрямитель переменного тока (кенотроны), детектор в радиоприемниках.

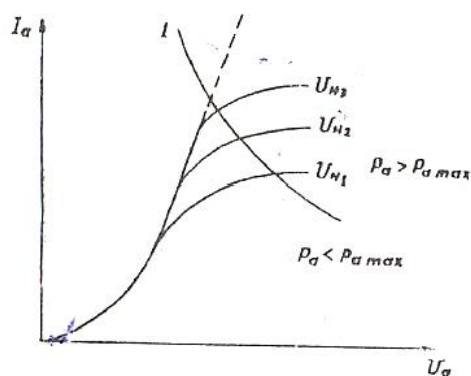


Рис. 2

При постоянной температуре катода 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, следовательно, возрастает и мощность, рассеиваемая анодом.

Для каждого типа лампы существует максимальная допустимая величина этой мощности – $P_{a\max}$, превышение которой может вывести лампу из строя. Она определяется конструкцией электродов, их геометрическими размерами и рассчитывается по формуле: $P_a = U_a I_a$. Уравнение $P_{a\max} = U_a I_a = \text{const}$ изображается на плоскости U_a, I_a гиперболой, асимптоты – координатные оси (см. рис.2, отмечено индексом «1»).

Температурная характеристика диода – это функция, выражающая зависимость анодного тока диода от величины напряжения накала: $I_a = f(U_n)$. По ней можно судить об эмиссионной способности катода, о возникновении и исчезновении пространственного заряда между катодом и анодом лампы. Для каждого типа ламп есть нормальное напряжение накала, которое нельзя превышать.

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

- Крутизна вольт-амперной характеристики: $S = \frac{dI_a}{dU_a}$
- Внутреннее 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: $S \approx \frac{\Delta I_a}{\Delta U_a}$.

2.1. Триод.

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 $T = \text{const}$ эта зависимость изображается в виде двух семейств статических характеристик (снимаются на постоянном токе), когда одно или другое напряжение считается постоянным. Статистические анодно-сеточные характеристики см. на рис.3: $I_a = f_1(U_c)_{U_a = \text{const}}$ и статистические анодные характеристики – на рис.4: $I_a = f_2(U_a)_{U_c = \text{const}}$.

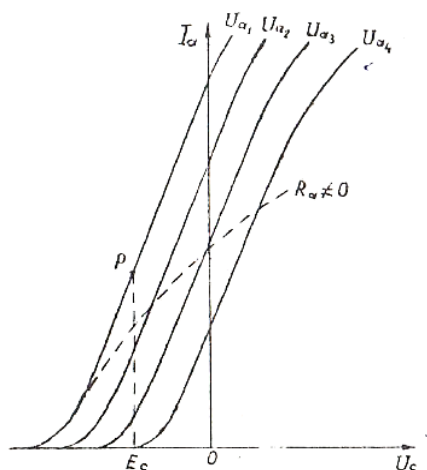


Рис. 3

При

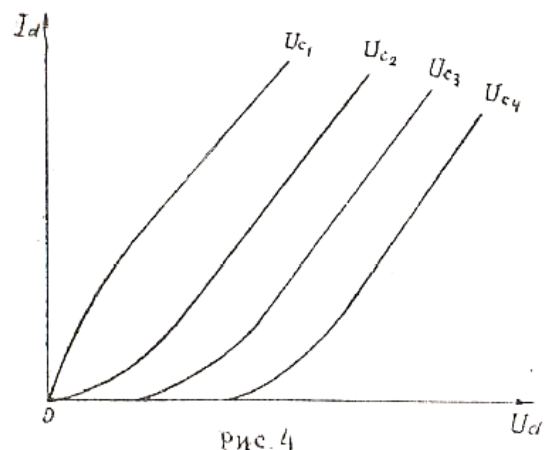


Рис. 4

увеличении U_a анодно-сеточные характеристики смещаются влево. То же происходит с анодными характеристиками при увеличении U_c . Анодный ток меняется нелинейно при изменениях и U_a , и U_c .

- Крутизна триода $S = \frac{\partial I_a}{\partial U_c} = \left[\frac{dI_a}{dU_c} \right]_{U_a = \text{const}}$
- Внутреннее сопротивление триода $R_i = \frac{\partial U_a}{\partial I_a} = \left[\frac{dU_a}{dI_a} \right]_{U_c = \text{const}}$

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. Найдем связь между этими параметрами, вычисляя полный дифференциал:

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

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:

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

- μ – 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 всегда можно найти третий, справедливо и для более сложных электронных ламп с большим количеством электродов.

2.2 Триод в режиме усиления.

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.

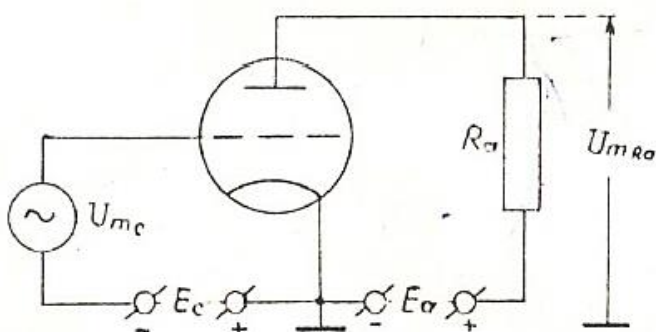


Рис.5

Источник E_c – источник сеточного смещения, служит для задания рабочей точки на анодно-сеточной характеристике (точка Р 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:

$$S_{\text{н}} = \frac{dI_a}{dU_c}$$

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

$$S_{\text{н}} = \frac{S}{1 + \frac{R_a}{R_i}}$$

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

$$K = \frac{U_{m_{Ra}}}{U_{m_c}}$$

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

Учтем, что $dU_{Ra} = R_a dI_a$, получим: $K = \frac{R_a dI_a}{dU_c} = R_a S_{\text{н}} = \frac{R_a S}{1 + \frac{R_a}{R_i}} = \frac{\mu}{1 + \frac{R_a}{R_i}}$.

Экспериментальная часть.

1. Снятие статической характеристики диода

U, В	I, мА
1	1,85
2	3,58
3	6,74
4	9,46
5	12,5
6	15,8
7	19,41
8	23,32
9	27,31
10	31,3
11	35,35
12	39,44
13	43,7
14	48,13
15	55,25
16	60,3
17	65,63
18	71,2
19	76,96
20	82,82
21	88,8
22	94,93

Таблица 1

Мы 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)

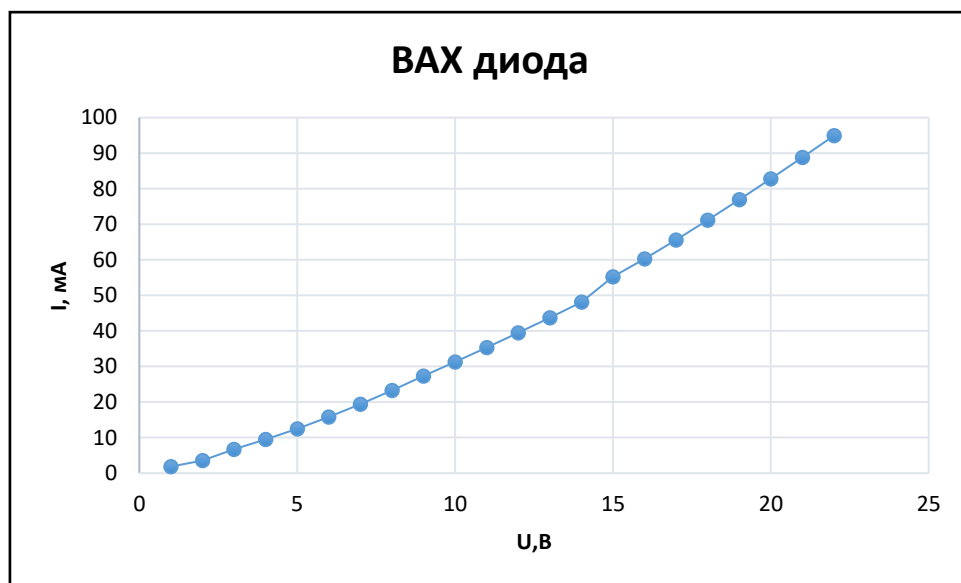


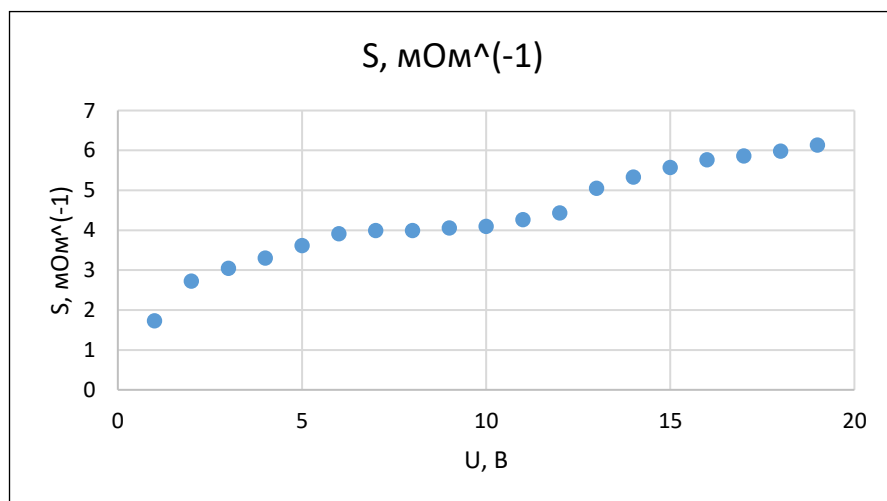
рис. 6

Вычислили крутизну в нескольких точках характеристики по формуле $S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_a}$:

$$S_{10-12} = \frac{39,44 - 31,3}{2} = 3,99 \text{ мОм}^{-1}$$

$$S_{12-14} = \frac{48,13 - 39,44}{2} = 4,07 \text{ мОм}^{-1}$$

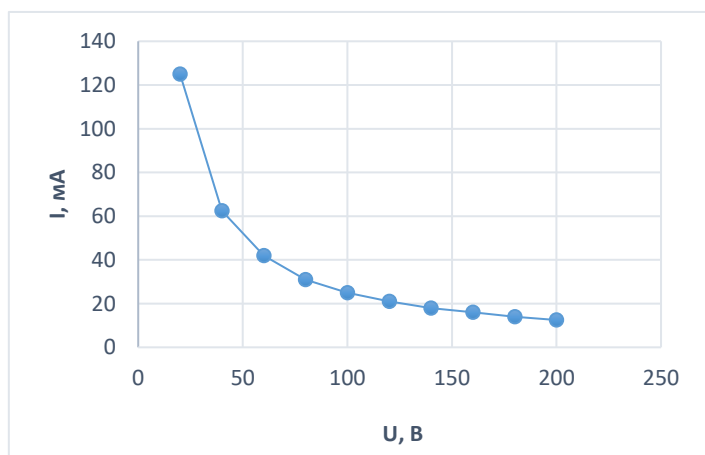
$$S_{14-16} = \frac{60,3 - 48,13}{2} = 4,345 \text{ мОм}^{-1}$$



2.Снятие статических характеристик триода

Перед снятием характеристик построили на графике гиперболу: $P_{a\max} = U_a I_a = \text{const}$ (рис.6) и при снятии следили, чтобы рассеиваемая мощность не превышала предельную допустимую для нашей лампы: $P_{a\max} = 2,5 \text{ Вт}$.

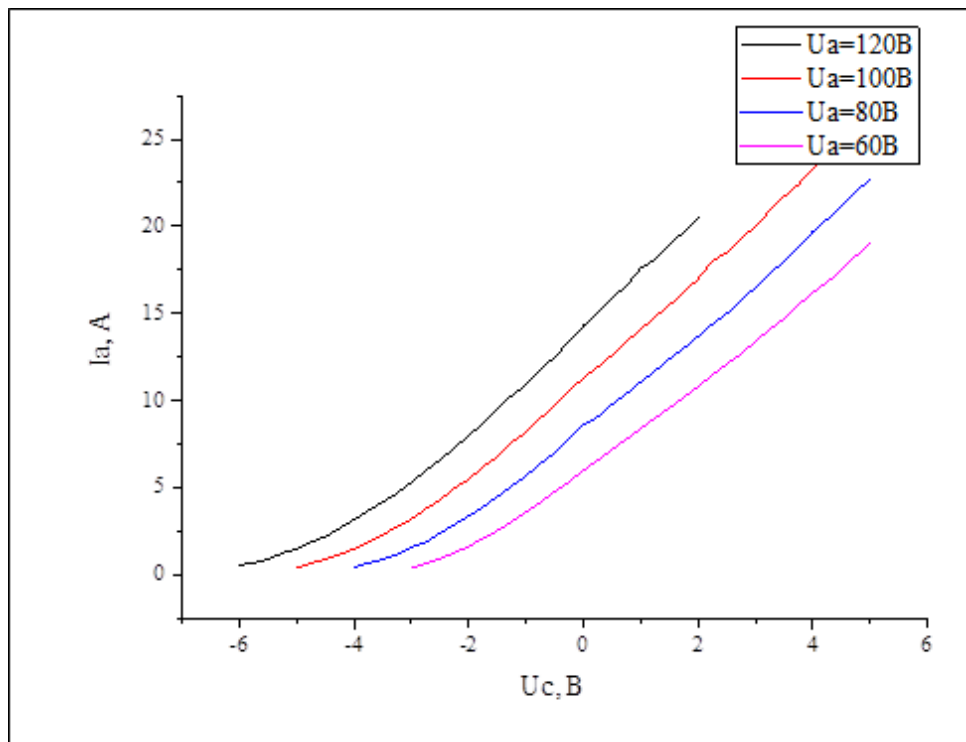
U, В	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
I, мА	125	62,5	42	31	25	21	18	16	14	12,5



Далее сняли семейство анодных характеристик при нескольких значений сеточного напряжения. Результаты занесли в Таблицу 2 и построили семейство сеточных кривых.

$U_a = 60\text{В}$	$U_c, \text{В}$	-3	-2,5	-2	-1,5	-1	-0,5	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
	$I_a, \text{мА}$	0,4	0,96	1,66	2,56	3,63	4,8	6	7,2	8,4	9,6	10,8	12,1	13,4	14,7	16,2	17,5	19
$U_a = 80\text{В}$	$U_c, \text{В}$	-4	-3,5	-3	-2,5	-2	-1,5	-1	-0,5	0	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	
	$I_a, \text{мА}$	0,47	0,9	1,6	2,4	3,4	4,5	5,7	7	8,6	11,1	12,4	13,7	15	16,5	18	19,7	
	$U_c, \text{В}$	4,5	5															
	$I_a, \text{мА}$	21,2	22,7															
$U_a = 100\text{В}$	$U_c, \text{В}$	-5	-4,5	-4	-3,5	-3	-2,5	-2	-1,5	-1	-0,5	0	0,5	1,5	2	2,5	3	3,5
	$I_a, \text{мА}$	0,4	0,9	1,5	2,3	3,2	4,3	5,5	6,8	8,2	9,7	11,3	12,6	15,5	17	18,5	20	21,7
	$U_c, \text{В}$	4	4,5															
	$I_a, \text{мА}$	23,3	25															
$U_a = 120\text{В}$	$U_c, \text{В}$	-6	-5,5	-5	-4,5	-4	-3,5	-3	-2,5	-2	-1,5	-1	-0,5	0	0,5	1,5	2	2,15
	$I_a, \text{мА}$	0,6	0,9	1,5	2,2	3,2	4,2	5,3	6,6	8	9,6	10,9	12,5	14,3	15,9	18,9	20,5	20,9

Таблица 2.



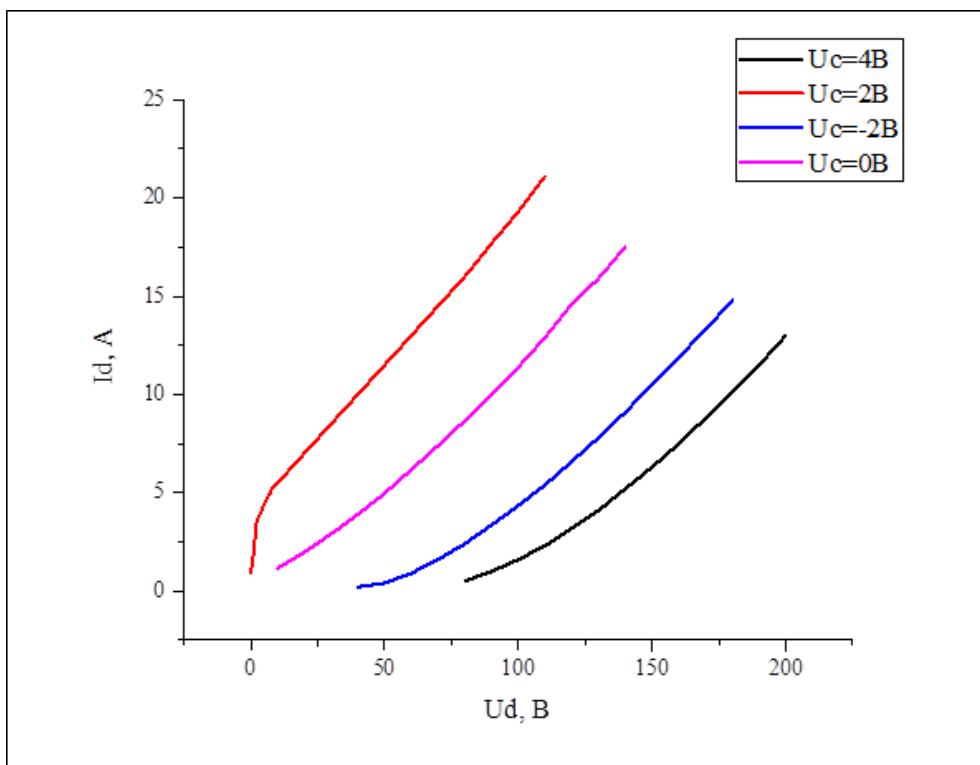
Так же для средних участков характеристик мы вычислили параметры S :

- При $U_a = 60\text{B}$ $S = 2,6 \text{ мОм}^{-1}$
- При $U_a = 80\text{B}$ $S = 2,8 \text{ мОм}^{-1}$
- При $U_a = 100\text{B}$ $S = 3,6 \text{ мОм}^{-1}$
- При $U_a = 120\text{B}$ $S = 2,64 \text{ мОм}^{-1}$

Аналогично сняли семейство сеточных характеристик при нескольких значениях анодного напряжения и фиксированного U_c (Таблица 3):

U_c $= -4B$	U_a, B	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	
	I_a, mA	0,5	1	1,6	2,3	3,2	4,1	5,2	6,3	7,5	8,8	10,1	11,5	13	
U_c $= -2B$	U_a, B	35	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160
	I_a, mA	0,2	0,4	0,9	1,6	2,4	3,36	4,35	5,4	6,6	7,8	9,1	10,5	11,9	13,3
	U_a, B	170													
	I_a, mA	14,8													
U_c $= 0$	U_a, B	2	6	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
	I_a, mA	0,55	0,85	1,15	1,98	2,9	3,9	4,97	6,18	7,4	8,67	10	11,4	12,9	14,6
	U_a, B	130	140												
	I_a, mA	15,9	17,5												
U_c $= 2B$	U_a, B	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20	30	40
	I_a, mA	0,9	1,9	3,4	3,8	4,1	4,4	4,7	4,9	5,2	5,4	5,5	7	8,5	10
	U_a, B	50	60	70	80	90	100	110							
	I_a, mA	11,5	13	14,5	16	17,7	19,3	21,1							

Таблица 3.



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

- При $U_c = 2\text{В}$, $R_i = 5882\text{ Ом}$,
 - При $U_c = 0$, $R_i = 68970\text{ Ом}$,
 - При $U_c = -2\text{В}$, $R_i = 8889\text{ Ом}$,
 - При $U_c = -4\text{В}$, $R_i = 9489\text{ Ом}$,
- Оценим статистический коэффициент при:
- $U_a = 100\text{В}$, $U_c = -4\text{В}$: $\mu \approx 34,2$
 - $U_a = 100\text{В}$, $U_c = -2\text{В}$: $\mu \approx 32$
 - $U_a = 100\text{В}$, $U_c = 0\text{В}$: $\mu \approx 24,8$
 - $U_a = 100\text{В}$, $U_c = 2\text{В}$: $\mu \approx 21,2$

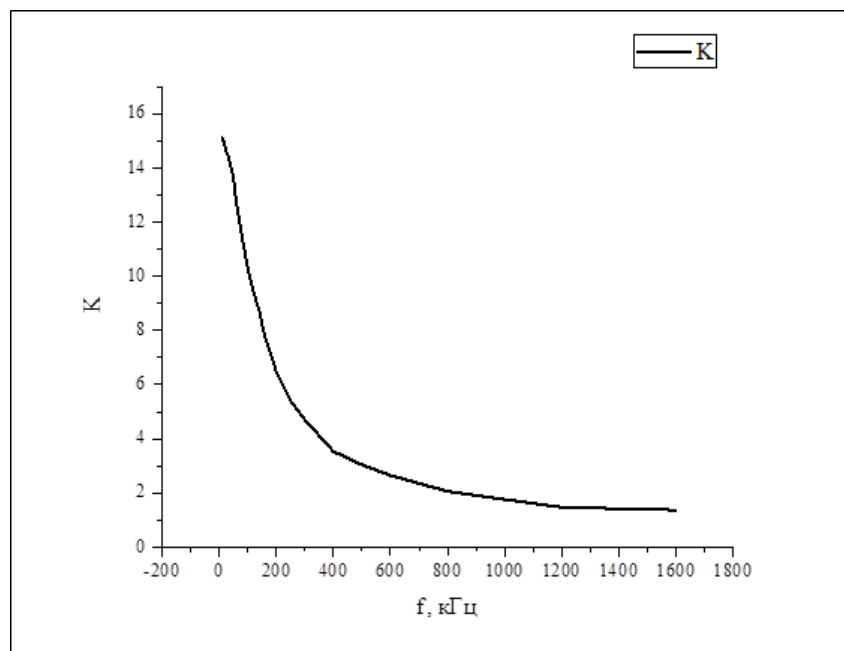
3. Определение коэффициента усиления усилителя

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 $K = 15$.

Проверили частотные свойства усилителя, сняли зависимость коэффициента усиления от частоты при $R = 46,7\text{кОм}$, результаты занесли в Таблицу 4:

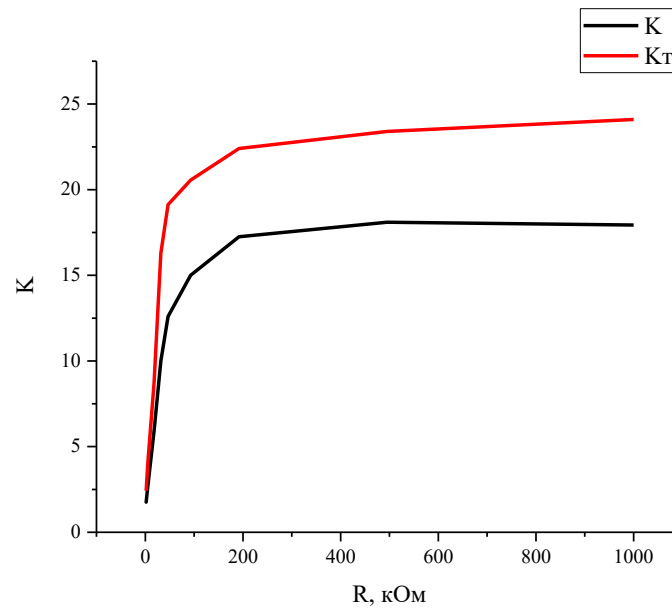
f, кГц	10	14	30	40	50	60	80	100	140	160	250	300	500	600	800
K	15,1	15	14,5	14,1	13,63	12,7	11,47	10,3	8,73	7,75	5,4	4,7	3,04	2,65	2,06

Таблица 4.



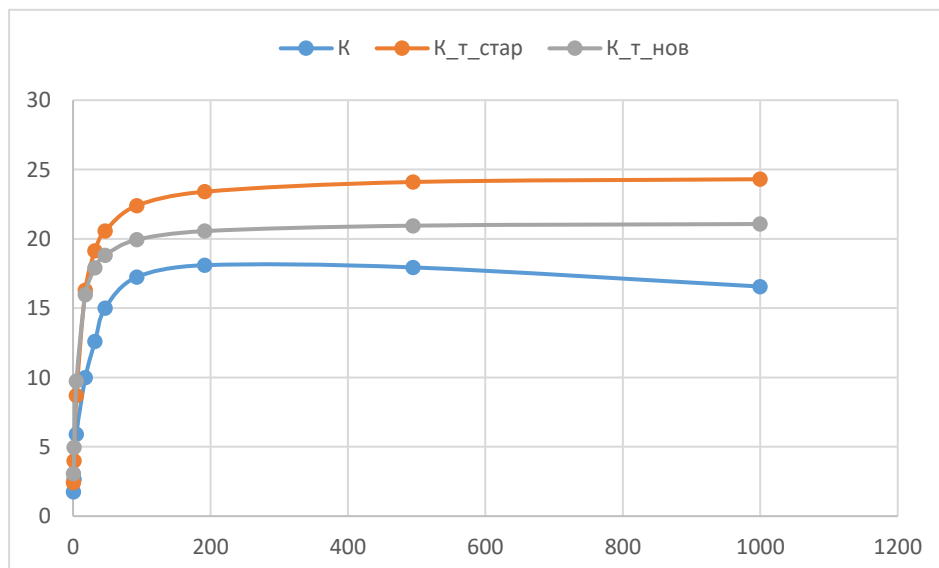
Далее всех возможных значений сопротивления нагрузки R_a вычислили K и сравнили с теоретическим значением (при $f=1\text{кГц}$), чтобы проверить зависимость $K = \frac{\mu}{1 + \frac{R_i}{R_a}}$:

R_a , кОм	1	1,8	5	18	32	46,7	93	192	495	1000
K	1,76	2,65	5,9	10	12,6	15	17,25	18,1	17,94	16,56
$K_{T_старое}$	2,42	4	8,7	16,3	19,13	20,56	22,4	23,4	24,1	24,3
$K_{T_новое}$	3,08	4,97	9,74	15,97	17,91	18,82	19,94	20,56	20,95	21,07



Зависимость $K = \frac{\mu}{1 + \frac{R_i}{R_a}}$ выполняется при значениях $R_a < 200 \text{ кОм}$, а вот при $R_a > 200 \text{ кОм}$ экспериментальная кривая начинает убывать из-за смещения рабочей точки – внутреннее сопротивление и статистический коэффициент усиления изменяются.

Различие величин примерно в 1,5 раза, это связано с тем, что при измерении мы не знали напряжение на сетке. Чтобы уменьшить различие, мы можем R_i , S , μ для $U_c=2\text{В}$ (т.е. увеличить напряжение на сетке) и $U_a = 100\text{В}$, т.е. $\mu \approx 21,2$, $S = 3,6 \text{ мОм}^{-1}$, $R_i = 5882 \text{ Ом}$.



Выводы.

- Изучили устройство простейших электронных ламп – диода и триода, сняли анодные характеристики диода, анодно-сеточные и анодные триода. 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.
- Проверили частотные свойства усилителя, сняв зависимость коэффициента усиления от частоты при $R=46,7\text{кОм}$, он уменьшался.
- Получили, что зависимость $K = \frac{\mu}{1+\frac{R_L}{R_a}}$ подтверждается экспериментально при значениях сопротивления $R_a < 200\text{кОм}$.