

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

«Национальный исследовательский Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского»

Радиофизический факультет

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ
ЛАМП ДИОДА И ТРИОДА**

Отчет по (учебной) практике
Студентов группы 427(0424С1ИБг1)
2 курса специалитета
Скороходов С.А., Степушов Г.С.

Основная образовательная программа
подготовки по направлению
10.05.02 «Информационная
безопасность
телекоммуникационных систем»
(направленность «Системы
подвижной цифровой
защищенной связи»)

Нижний Новгород 2025

I. Введение	2
Цель	2
Задачи	2
Приборы и оборудование	2
II. Теоретическая часть	3
1. Диод	3
2. Вывод закона $3/2$ Ленгмюра	4
3. Обработка и построение графиков	5
3.1 Аппроксимация теоретического графика крутизны S . .	5
4. Вычисление погрешностей	6
4.1 Приборная погрешность источника питания постоянного тока Б5-50	6
4.2 Приборная погрешность GDM-8245 при измерении посто- янного тока	6
4.3 Косвенная погрешность крутизны S	6
4.4 Приборная погрешность генератора низкочастотных сиг- налов ГЗ-112	7
4.5 Вычисление косвенной погрешности коэффициента K . .	7
III. Практическая часть	8
1. Исследование лампы диода	8
1.1 Снятие статической характеристики диода	8
2. Исследование лампы триода	9
2.1 Расчет предельной мощности (Рис. 2)	9
2.2 Изучение АЧХ усилителя	9
2.3 Зависимость усиления от сопротивления на нагрузки . .	12
2.4 Снятие сеточной характеристики	12
IV. Вывод	14
V. Контрольные вопросы	15
VI. Приложение	18
Приложение 1. Вычисление величины крутизны S	18
Приложение 2. Вычисление погрешности постоянного тока I_a	18
Приложение 3. Вычисление погрешности напряжения U_a	18
Приложение 4. Вычисление косвенной погрешности S	19
Приложение 5. Вычисление параметра B	20
Приложение 6. Вычисление коэффициента усиления K	20
Приложение 7. Вычисление приборной погрешности сигнала	20

I. ВВЕДЕНИЕ

Цель

- 1

Задачи

1. Внимательно ознакомиться с экспериментальной установкой;

Приборы и оборудование

1. Источник питания постоянного тока Б5-50;
2. Вольтметр универсальный GDM-8245;
3. Генератор низкочастотных сигналов ГЗ-112;

II. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1. Дiode

Конструктивно диод состоит из баллона (стеклянного, металлического или керамического), в котором создается вакуум $\sim 10^{-7}$ мм ртутного столба, и системы плоских или цилиндрических электродов: катода и анода.

Катод в простейшем случае представляет собой накаливаемую током вольфрамовую нить, которая при достаточно высокой температуре начинает испускать электроны (это явление получило название *термоэлектронной эмиссии*). Но такие прямоканальные катоды применяются очень редко; значительно большее распространение получили катоды с косвенным подогревом, где источником электронов служит 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 таких катодов часто покрываются тонкой пленкой из материалов, имеющих малую работу выхода электронов, что позволяет получить хорошую эмиссию при сравнительно небольшом подогреве.

Если соединить анод с катодом через чувствительный гальванометр, то можно обнаружить в этой цепи анодный ток, величина определенная электрическая мощность. Электроны, излучаемые 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 ламп существует максимальная допустимая величина этой мощности – P_{max} . Превышение ее при работе ламп может вывести последнюю из строя. Величину мощности, рассеиваемой анодом, можно подсчитать по формуле

$$P_a = U_a I_a \quad (1)$$

Уравнение $P_a^{max} = U_a I_a = const$ на плоскости U_a, I_a изображается гиперболой, асимптотами которой являются координатные оси. На рис.2 эта кривая отмечена индексом "1". Чтобы лампа не вышла из строя, всегда надо следить за тем, чтобы при работе с ней не превышать максимально допустимой мощности, рассеиваемой анодом, т.е. работать только в области $P_a < P_a^{max}$. Для каждого типа ламп величина P_a^{max} определяется конструкцией электродов и их геометрическими размерами. У очень мощных ламп для повышения этой мощности приходится применять меры принудительного охлаждения анода (водяное и воздушное охлаждение).

Функция, выражающая зависимость анодного тока диода от величины напряжения накала $I_a = f(U_n)$, называется температурной характеристикой диода.

да. По ней можно судить об эмиссионной способности катода, о возникновении и исчезновении пространственного заряда между катодом и анодом лампы. Для каждого типа ламп существует нормальное напряжение накала, величину которого нельзя превышать.

Представление о работе диода можно составить и не зная его характеристик, если известны параметры диода: крутизна вольт-амперной характеристики

$$S = \frac{dI_a}{dU_a}, \quad (2)$$

измеряемая обычно в $\frac{\text{мА}}{\text{В}}$ или обратная ей величина – внутреннее сопротивление $R_i = \frac{1}{S}$. Т.к. характеристика диода существенно нелинейна, то это дифференциальные параметры зависят от значений I_a и U_a , т.е. $S = f(U_a)$. На практике приближенное значение крутизны можно определить по вольт-амперной характеристике. Взяв небольшое приращение анодного напряжения ΔU_a так, чтобы в этих пределах участок анодной характеристики можно считать линейным, по характеристике определим приращение тока ΔI_a . И тогда

$$S \approx \frac{\Delta I_a}{\Delta U_a} \quad (3)$$

2. Вывод закона 3/2 Ленгмюра

Определим зависимость анодного тока от анодного напряжения в диоде, образованном двумя плоскими, безграничными, параллельными друг другу пластинами. В этом случае можно пренебречь краевым эффектом и считать поле между анодом и катодом однородным. Примем следующие допущения. Пусть у поверхности катода ($x = 0$) $U_k = 0$ и начальная скорость электронов $u_0 = 0$.

Если предположить, что электроды вакуумной трубки плоские, а температура катода постоянная, то потенциал электрического поля будет зависеть только от одной координаты x , направленной вдоль вакуумной трубки от катода к аноду.

Используем одно из уравнений Максвелла в дифференциальной форме:

$$\text{div} E = \frac{\rho}{\epsilon_0},$$

где ρ – объёмная плотность заряда. Спроецируем это уравнение на ось x :

$$\frac{\partial E}{\partial x} = -\frac{1}{\epsilon_0} en \quad (4)$$

Знак минус учитывает, что эмитируемые электроны имеют отрицательный заряд, ϵ_0 – электрическая постоянная, n – концентрация электронов, E – напряженность электрического поля.

Работа по перемещению единичного точечного положительного заряда из

одной точки поля в другую вдоль оси x при условии, что точки расположены бесконечно близко друг к другу $x_2 - x_1 = dx$, равна $E_x dx$. Та же работа равна $\phi_1 - \phi_2 = -dU$. Приравняв оба выражения, можем записать:

$$E_x = -\frac{dU}{dx} \quad (5)$$

Выразим напряженность E через потенциал U , с помощью формулы (5). Заряд можно представить как количество элементарных зарядов (электронов) или заряд электрона на концентрацию в объеме:

$$q = eN = enV \quad (6)$$

С другой стороны объемная плотность заряда равна:

$$\rho = \frac{dq}{dV} = \frac{d}{dV} enV = en$$

Тогда получаем, что объемная плотность тока равна:

$$j = \rho u = enu \quad (7)$$

Концентрацию выразим через объемную плотность тока, а скорость электронов – из закона сохранения энергии: $mu^2/2 = eU$:

$$n = \frac{j}{eu} \quad (8)$$

$$u = \sqrt{\frac{2eU}{m}} \quad (9)$$

Тогда уравнение (4) с учетом (5), (8) и (9) принимает вид:

3. Обработка и построение графиков

3.1 Аппроксимация теоретического графика крутизны S

Из формулы закона трех вторых мы имеем *степенную зависимость* данных. Для построения теоретического графика заменим переменные тока и напряжения на оси x ($x = U_a$) и $y = I_a$:

$$y = Bx^{3/2} \quad (10)$$

Будем использовать метод наименьших квадратов для получения значения переменной g (первеанс).

$$S = \sum_{i=1}^n \left(Bx_i^{\frac{3}{2}} - y_i \right)^2 \quad S \rightarrow \min$$

Для нахождения минимума функции суммы необходимо вычислить ее частную производную по g и приравнять к нулю.

$$\frac{\partial S}{\partial B} = \sum_{i=1}^n 2 \left(Bx_i^{\frac{3}{2}} - y_i \right) x_i^{\frac{3}{2}} = 2 \sum_{i=1}^n \left(Bx_i^3 - y_i x_i^{\frac{3}{2}} \right) \quad \frac{\partial S}{\partial B} = 0$$

$$B \sum_{i=1}^n x_i^3 = \sum_{i=1}^n y_i x_i^{\frac{3}{2}}$$

$$B = \frac{\sum_{i=1}^n y_i x_i^{\frac{3}{2}}}{\sum_{i=1}^n x_i^3}$$

(11)

4. Вычисление погрешностей

4.1 Приборная погрешность источника питания постоянного тока Б5-50

Приборная погрешность установки выходного напряжения в режиме стабилизации напряжения не превышает:

$$\Delta U_{\text{приб}} = \pm(0,5\%U + 0,1\%U_{\text{макс}}), \quad (12)$$

где U и $U_{\text{макс}}$ – устанавливаемое и максимальное значение выходного напряжения прибора.

Из характеристик прибор мы знаем, что $U_{\text{макс}} = 299$ В, поэтому:

$$\Delta U_{\text{приб}} = 0,005U + \frac{299}{1000} \text{ В}$$

(13)

4.2 Приборная погрешность GDM-8245 при измерении постоянного тока

Приборная погрешность GDM-8245 при измерении постоянного тока:

$$\Delta I_{\text{приб}} = \pm(0,002 \cdot I + 2 \cdot dI)$$

(14)

где I и dI – получаемый ток и цена деления измерения прибора.

4.3 Косвенная погрешность крутизны S

Выведем формулу косвенной погрешности крутизны из формулы (3):

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_a} = \frac{I_{a_2} - I_{a_1}}{U_{a_2} - U_{a_1}}$$

$$\Delta S = \sqrt{\left(\frac{\partial S}{\partial I_{a_1}} \Delta I_{a_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial S}{\partial I_{a_2}} \Delta I_{a_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial S}{\partial U_{a_1}} \Delta U_{a_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial S}{\partial U_{a_2}} \Delta U_{a_2}\right)^2} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \Delta S &= \\ &= \sqrt{\frac{\Delta I_{a_1}^2}{(U_{a_2} - U_{a_1})^2} + \frac{\Delta I_{a_2}^2}{(U_{a_2} - U_{a_1})^2} + \frac{(I_{a_2} - I_{a_1})^2}{(U_{a_2} - U_{a_1})^4} \Delta U_{a_1}^2 + \frac{(I_{a_2} - I_{a_1})^2}{(U_{a_2} - U_{a_1})^4} \Delta U_{a_2}^2} = \\ &= \boxed{\frac{\sqrt{(\Delta I_{a_1}^2 + \Delta I_{a_2}^2)(U_{a_2} - U_{a_1})^2 + (\Delta U_{a_1}^2 + \Delta U_{a_2}^2)(I_{a_2} - I_{a_1})^2}}{(U_{a_2} - U_{a_1})^2}} \quad (16) \end{aligned}$$

4.4 Приборная погрешность генератора низкочастотных сигналов ГЗ-112

Относительная приборная погрешность ГЗ-112 при создании сигнала ν :

$$\Delta \nu_{\text{пр}} = \pm \left(2 + \frac{30}{\nu_{\text{уст}}}\right) \% \quad (17)$$

где $\nu_{\text{уст}}$ – значение, установленное на шкале регулятора частоты. Распишем:

$$\boxed{\Delta \nu_{\text{пр}} = \pm \left(\frac{2 \nu_{\text{уст}} + 30}{100} k\right)} \quad (18)$$

где k – значение множителя на генераторе.

4.5 Вычисление косвенной погрешности коэффициента К

Выведем формулу косвенной погрешности крутизны из формулы (24):

$$K = \frac{2U_{\text{ВЫХ}}}{2U_{\text{ВХ}}}$$

$$\Delta K = \sqrt{\left(\frac{\partial K}{\partial 2U_{\text{ВЫХ}}} \Delta 2U_{\text{ВЫХ}}\right)^2 + \left(\frac{\partial K}{\partial 2U_{\text{ВХ}}} \Delta 2U_{\text{ВХ}}\right)^2} \quad (19)$$

$$\Delta K = \sqrt{\frac{\Delta(2U_{\text{ВЫХ}})^2}{(2U_{\text{ВХ}})^2} + \frac{(2U_{\text{ВЫХ}})^2 \Delta(2U_{\text{ВХ}})^2}{(2U_{\text{ВХ}})^4}} \quad (20)$$

III. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1. Исследование лампы диода

1.1 Снятие статической характеристики диода

Таблица 1. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) диода и результаты вычислений погрешностей и крутизны

(a)		(b)			
U_a , В	I_a , мА	ΔU_a , В	ΔI_a , мА	S , $\frac{\text{мА}}{\text{В}}$	ΔS , $\frac{\text{мА}}{\text{В}}$
2	3,78	0,31	0,03	—	—
4	10,16	0,32	0,04	3,19	0,71
6	16,88	0,33	0,05	3,36	0,77
8	24,84	0,34	0,07	3,98	0,94
10	32,40	0,35	0,08	3,78	0,92
12	40,90	0,36	0,10	4,25	1,07
14	49,94	0,37	0,12	4,52	1,17
16	62,40	0,38	0,14	6,23	1,65
18	73,52	0,39	0,17	5,56	1,52
20	86,31	0,40	0,19	6,40	1,79

В ходе лабораторного эксперимента проведено снятие статической вольт-амперной характеристики полупроводникового диода. Результаты экспериментальных измерений зависимости анодного тока I_a от анодного напряжения U_a представлены в табл. 1а.

Дифференциальная крутизна вольт-амперной характеристики S рассчитана в соответствии с уравнением (3) (см. прил. 1) и занесена в табл. 1б. Проведенный анализ полученных данных демонстрирует нелинейный характер возрастания крутизны характеристики при увеличении анодного напряжения.

Погрешности измерений анодного напряжения ΔU_a и анодного тока ΔI_a приняты равными приборным погрешностям и вычислены согласно уравнениям (13) и (14) (см. прил. 2 и 3). Погрешность определения крутизны ΔS рассчитана по формуле (16) (см. прил. 4).

Определим среднеарифметическое значение крутизны вольт-амперной характеристики:

$$S_{\text{cp}} = \frac{3,19+3,36+3,98+3,78+4,25+4,52+6,23+5,56+6,40}{9} \frac{\text{мА}}{\text{В}} \approx 4,59 \frac{\text{мА}}{\text{В}} \quad (21)$$

$$\Delta S_{\text{cp}} = \frac{0,71+0,77+0,94+0,92+1,07+1,17+1,65+1,52+1,79}{9} \frac{\text{мА}}{\text{В}} \approx 1,17 \frac{\text{мА}}{\text{В}} \quad (22)$$

$$S_{\text{cp}} = (4,59 \pm 1,17) \frac{\text{мА}}{\text{В}}$$

На рис. 1 представлен график зависимости $I_a(U_a)$ с нанесенными экспериментальными точками и областями погрешностей измерений. Теоретическая

кривая построена в соответствии с уравнением (11), из анализа которого определен параметр B (см. прил. 5):

$$B = (0,97 \pm 0,05) \frac{\text{мА}}{\text{В}^{3/2}}$$

Сравнение экспериментальных данных с теоретической зависимостью показывает их удовлетворительное согласование в исследованном диапазоне напряжений, что подтверждает адекватность примененной теоретической модели.

2. Исследование лампы триода

2.1 Расчет предельной мощности (Рис. 2)

В соответствии с максимальной рассеиваемой мощностью лампы рассчитали максимально допустимый ток для $U_a \in [10 : 240]$ В.

$$P_{max} = U_a I_a = \text{const} = 2,5 \text{ Вт}$$

$$I_a^{max} = \frac{P_{max}}{U_a} = \frac{2,5}{U_a} \quad (23)$$

Таблица 2. Максимальный допустимый ток

U_a , В	I_a , мА	U_a , В	I_a , мА	U_a , В	I_a , мА	U_a , В	I_a , мА
10	250.00	70	35.71	130	19.23	190	13.16
20	125.00	80	31.25	140	17.86	200	12.50
30	83.33	90	27.78	150	16.67	210	11.90
40	62.50	100	25.00	160	15.63	220	11.36
50	50.00	110	22.73	170	14.71	230	10.87
60	41.67	120	20.83	180	13.89	240	10.42

2.2 Изучение АЧХ усилителя

Подав на вход усилителя сигнал амплитудой $U_{\text{вх}} = 100$ мВ с генератора ГЗ-112, изменяя частоту, сняли зависимость выходной амплитуды от частоты (АЧХ) и рассчитали коэффициент усиления для каждого значения частоты по формуле (24) (см. прил. 6).

$$K = \frac{2U_{\text{вых}}}{2U_{\text{вх}}} = \frac{2U_{\text{вых}}}{2 \cdot 100 \text{ мВ}} = \frac{2U_{\text{вых}}}{0,2 \text{ В}} \quad (24)$$

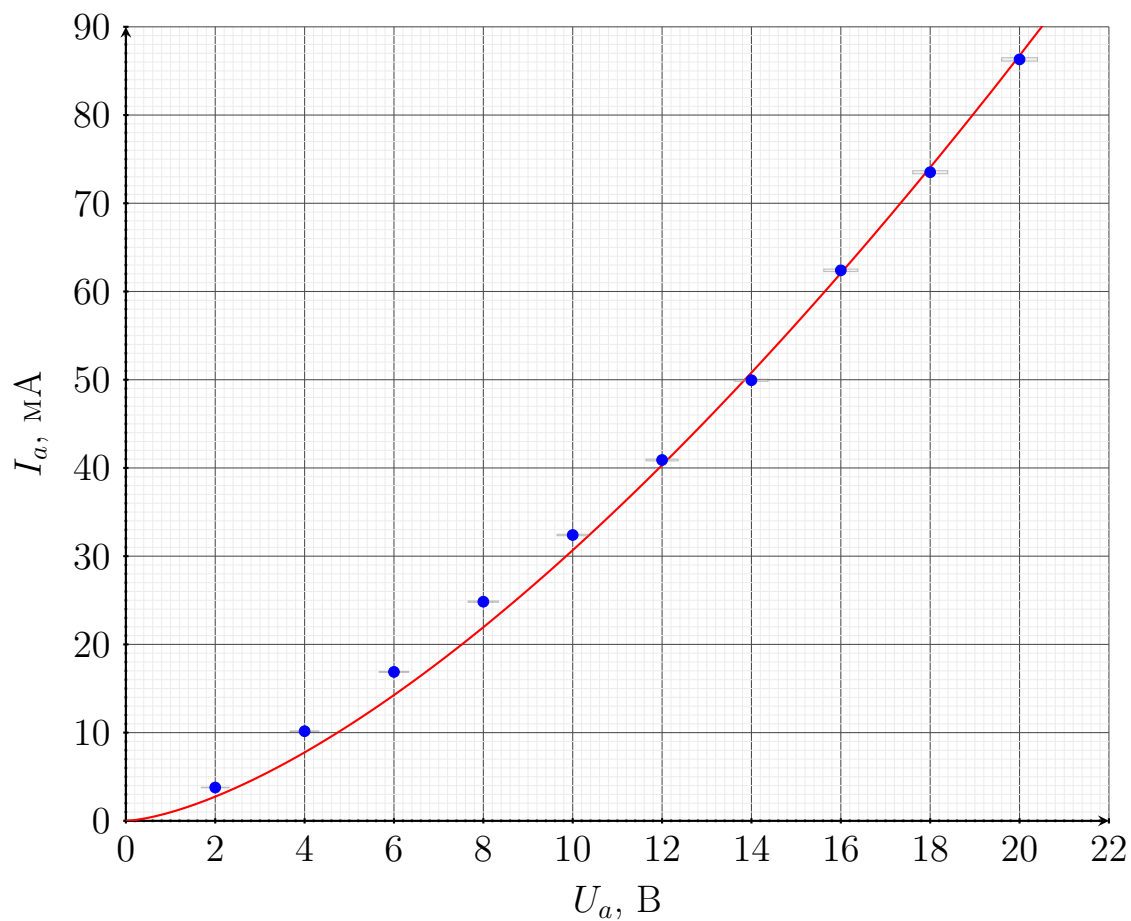


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика диода с погрешностями измерений и теоретической линией

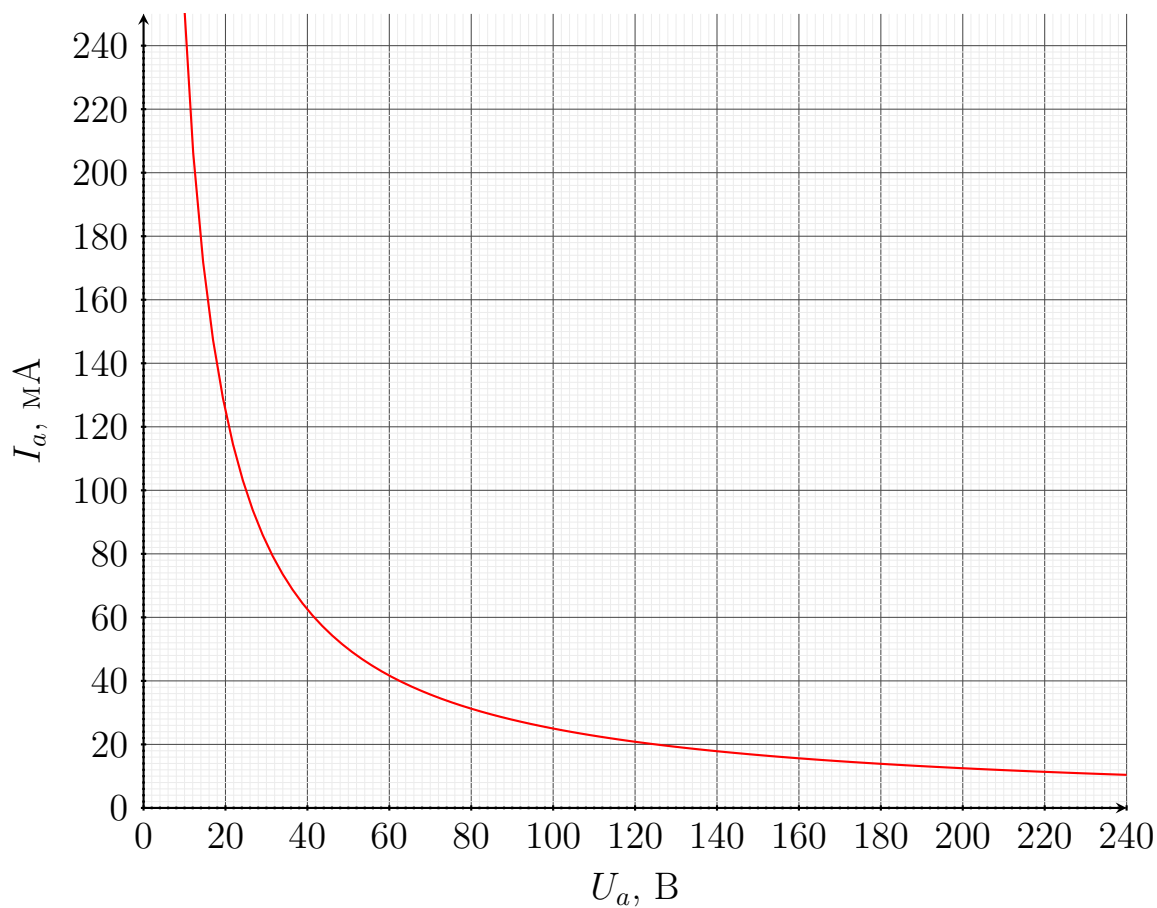


Рис. 2. Кривая максимально допустимого тока

Таблица 3. Снятие анодной характеристики триода

U_a , В	I_a^{-4B} , мА	I_a^{-2B} , мА	I_a^{0B} , мА	I_a^{2B} , мА	I_a^{\max} , мА
10	—	—	1,39	4,67	250,00
20	—	—	2,35	6,01	125,00
30	—	0,16	3,39	7,50	83,33
40	—	0,54	4,50	8,97	62,50
50	—	1,13	5,77	10,47	50,00
60	0,12	1,90	6,97	12,00	41,67
70	0,34	2,81	8,33	13,59	35,71
80	0,72	3,82	9,72	15,20	31,25
90	1,26	4,92	11,19	16,88	27,78
100	1,95	6,18	12,73	18,57	25,00
110	2,77	7,46	14,32	20,31	22,73
120	3,72	8,77	15,45	—	20,83
130	4,75	10,16	17,60	—	19,23
140	5,93	11,65	—	—	17,86
150	7,15	—	—	—	16,67
160	8,44	—	—	—	15,63
170	9,84	—	—	—	14,71
180	11,27	—	—	—	13,89

Таблица 4. Снятие амплитудно-частотной характеристики усилителя

$\nu_{уст}$, Гц	Множитель	ν , кГц	$2U_{вых}$, В	K	$\Delta\nu$, кГц	ΔK
10	10^2	1	0,360	1,80	0,1	
20	10^3	20	0,352	1,76	0,7	
40	10^3	40	0,356	1,78	1,1	
50	10^3	50	0,348	1,74	1,3	
70	10^3	70	0,352	1,76	1,7	
90	10^3	90	0,352	1,76	2,1	
12	10^4	120	0,352	1,76	5,4	
14	10^4	140	0,352	1,76	5,8	
18	10^4	180	0,344	1,72	6,6	
23	10^4	230	0,344	1,72	7,6	
27	10^4	270	0,336	1,68	8,4	
50	10^4	500	0,308	1,54	13,0	
60	10^4	600	0,288	1,44	15,0	
70	10^4	700	0,272	1,36	17,0	
80	10^4	800	0,254	1,27	19,0	
90	10^4	900	0,240	1,20	21,0	

2.3 Зависимость усиления от сопротивления на нагрузки

2.4 Снятие сеточной характеристики

Были сняты 3 анодно-сеточных характеристик для разных напряжений на аноде: 60, 80, 100 В (см. табл. 5).

Таблица 5. Анодно-сеточная характеристика триода

(a) $U_a = 60$ В		(b) $U_a = 80$ В		(c) $U_a = 100$ В	
U_c , В	I_a , мА	U_c , В	I_a , мА	U_c , В	I_a , мА
—	—	—	—	-5,55	0,53
—	—	—	—	-4,97	0,87
—	—	-4,53	0,37	-4,54	1,28
—	—	-4,00	0,73	-4,03	1,92
—	—	-3,52	1,20	-3,50	2,78
-3,16	0,50	-3,08	1,78	-3,10	3,55
-2,38	1,31	-2,50	2,78	-2,53	4,78
-2,04	1,85	-2,00	3,80	-2,04	6,09
-1,54	2,78	-1,54	4,96	-1,50	7,56
-1,09	3,76	-0,95	6,40	-1,05	8,90
-0,55	5,16	-0,57	7,60	-0,55	10,48
0,08	6,80	0,06	9,50	0,11	12,62
0,52	7,90	0,52	10,78	0,51	13,85
1,02	9,16	0,98	12,12	1,07	15,54
1,57	10,60	1,50	13,49	1,48	16,77
2,04	11,85	2,13	15,34	2,09	18,66
2,54	13,21	2,53	16,52	2,55	20,13
3,04	14,62	2,99	17,92	3,07	21,83
3,57	16,15	3,50	19,51	3,52	23,26
4,08	17,70	4,02	21,17	—	—
4,47	18,90	4,51	22,75	—	—

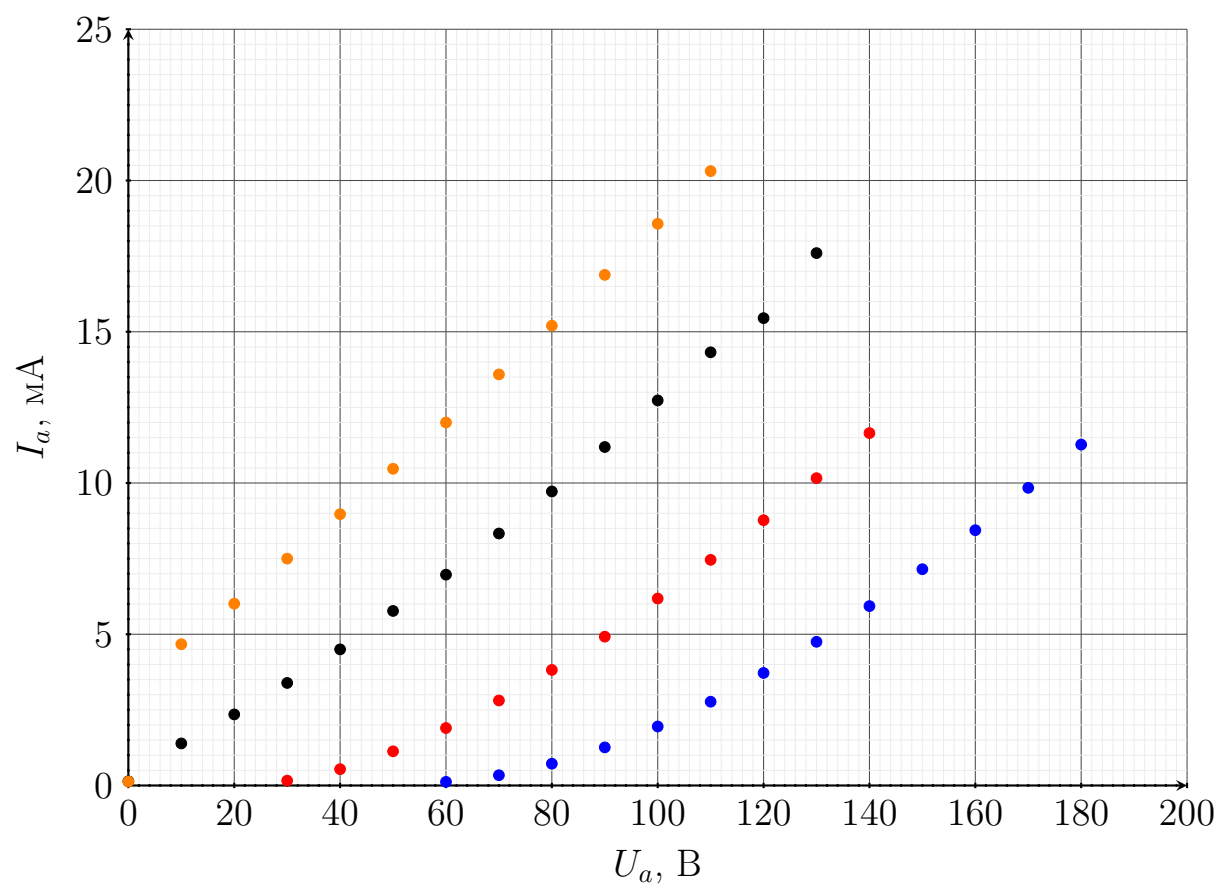


Рис. 3. Анодная характеристика триода

IV. ВЫВОД

Вывод к лабораторной работе

V. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объясните качественно ход анодной характеристики лампы, включенной диодом.

Анодная характеристика лампы, включённой диодом (то есть когда сетка соединена с анодом или просто отсутствует в схеме), отражает зависимость анодного тока I_a от анодного напряжения U_a при фиксированном напряжении накала. При малых значениях U_a ток практически равен нулю — электроны, испущенные катодом за счёт термоэлектронной эмиссии, не имеют достаточной кинетической энергии, чтобы преодолеть пространственный заряд у катода и долететь до анода. По мере роста U_a всё больше электронов достигают анода, ток начинает расти. В области умеренных напряжений выполняется закон трёх вторых

$$I_a = BU_a^{3/2},$$

где g — первеанс лампы, зависящий от геометрии электродов.

При дальнейшем увеличении U_a практически все эмитированные катодом электроны достигают анода, и ток выходит на насыщение, ограниченное только эмиссионной способностью катода. Таким образом, характеристика имеет характерный S-образный вид: медленный рост в начале, крутой подъём в средней части и выход на горизонтальный участок насыщения. В нашем эксперименте это хорошо видно на графике (рис. 1), где экспериментальные точки отлично ложатся на теоретическую кривую с первеансом $B = 0,97 \frac{\text{мА}}{\text{В}^{3/2}}$.

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

Если пренебречь начальной скоростью вылета электронов и считать электрическое поле между катодом и анодом однородным, то движение электрона описывается законами классической механики в постоянном ускоряющем поле. Ускорение электрона $a = \frac{eU_a}{m_e d}$, где d — расстояние между катодом и анодом, e и m_e — заряд и масса электрона. Скорость у поверхности анода найдём из сохранения энергии: $\frac{m_e v^2}{2} = eU_a$, откуда $v = \sqrt{\frac{2eU_a}{m_e}}$. Время пролёта t определим из равнопеременного движения: $d = \frac{1}{2}at^2$, следовательно $t = \sqrt{\frac{2d}{a}} = \sqrt{\frac{2m_e d^2}{eU_a}}$. Эти выражения показывают, что при увеличении анодного напряжения скорость электронов растёт пропорционально $\sqrt{U_a}$, а время пролёта уменьшается как $1/\sqrt{U_a}$, что важно для оценки частотных свойств лампы.

3. Каков будет анодный ток триода, если его сетку оставить никуда не подключенной?

Если сетку триода оставить никуда не подключённой (плавающий потенциал), то на неё будет оседать часть электронов, летящих от катода к аноду,

и сетка зарядится до небольшого отрицательного потенциала относительно катода (обычно несколько вольт). Этот отрицательный заряд создаёт тормозящее поле для последующих электронов, поэтому анодный ток будет заметно меньше, чем при соединении сетки с катодом (режим диода). По сути, триод с неподключённой сеткой работает как диод с дополнительным тормозящим электродом, и ток определяется уже не полной эмиссией катода, а только той долей электронов, которые способны преодолеть потенциальный барьер у сетки.

4. Каков будет характер движения электронов, если на сетку подать большой положительный потенциал, а на анод небольшой отрицательный по отношению к катоду?

При большом положительном потенциале на сетке и небольшом отрицательном потенциале на аноде относительно катода электроны, вылетевшие из катода, сначала сильно ускоряются к сетке, пролетают между её проволоками и попадают в область между сеткой и анодом. Там они попадают в тормозящее поле и начинают замедляться. Если кинетической энергии, набранной до сетки, хватает, чтобы долететь до анода даже против тормозящего поля, возникает анодный ток. Однако при достаточно отрицательном аноде большинство электронов не доходит до анода, разворачивается и летит обратно к сетке. Таким образом, почти весь эмиссионный ток катода замыкается на сетку, а анодный ток становится близким к нулю. Движение электронов приобретает характер осцилляций между сеткой и анодом — это явление называют электронным динаatronным эффектом.

5. В чем отличие внутреннего сопротивления триода от его сопротивления постоянному току?

Внутреннее сопротивление триода $R_i = 1/S$ — это дифференциальное сопротивление по аноду при фиксированном напряжении на сетке, то есть $R_i = \left(\frac{\partial U_a}{\partial I_a} \right)_{U_g = \text{const}}$. Оно характеризует, насколько сильно нужно изменить анодное напряжение, чтобы изменить анодный ток на единицу, и обычно составляет единицы–десятки килоом. Сопротивление постоянному току $R_{\text{пост}} = U_a/I_a$ — это просто отношение рабочей точки на анодной характеристике, оно может быть от сотен ом до сотен килоом в зависимости от режима и обычно значительно меньше R_i . Разница возникает потому, что крутизна S учитывает управление током через геометрию сетки, а $R_{\text{пост}}$ — это статическое сопротивление в конкретной точке.

6. Чем определяются частотные свойства триода?

Частотные свойства триода определяются в первую очередь временем пролёта электронов между катодом и анодом (а также между сеткой и анодом). На высоких частотах входной сигнал на сетке успевает измениться за время, пока электрон летит к аноду, и фаза анодного тока начинает отставать от фазы сеточного напряжения. Кроме того, важны межэлектродные ёмкости

(сетка–катод, сетка–анод, анод–катод), которые шунтируют сигнал на высоких частотах, и инерционность катода (тепловая инерция эмиссии). В нашем эксперименте это проявилось в спаде АЧХ усилителя уже на сотнях килогерц — коэффициент усиления упал с 1,8 до 1,2 при росте частоты с 1 кГц до 900 кГц.

VI. ПРИЛОЖЕНИЕ

Приложение 1. Вычисление величины крутизны S

$$\begin{aligned} S_1 &= \frac{I_{a_2} - I_{a_1}}{U_{a_2} - U_{a_1}} = \frac{10,16 \text{ мА} - 3,78 \text{ мА}}{4 \text{ В} - 2 \text{ В}} = 3,19 \frac{\text{мА}}{\text{В}} \\ S_2 &= \frac{I_{a_3} - I_{a_2}}{U_{a_3} - U_{a_2}} = \frac{16,88 \text{ мА} - 10,16 \text{ мА}}{6 \text{ В} - 4 \text{ В}} = 3,36 \frac{\text{мА}}{\text{В}} \\ S_3 &= \frac{I_{a_4} - I_{a_3}}{U_{a_4} - U_{a_3}} = \frac{24,84 \text{ мА} - 16,88 \text{ мА}}{8 \text{ В} - 6 \text{ В}} = 3,98 \frac{\text{мА}}{\text{В}} \\ S_4 &= \frac{I_{a_5} - I_{a_4}}{U_{a_5} - U_{a_4}} = \frac{32,4 \text{ мА} - 24,84 \text{ мА}}{10 \text{ В} - 8 \text{ В}} = 3,78 \frac{\text{мА}}{\text{В}} \\ S_5 &= \frac{I_{a_6} - I_{a_5}}{U_{a_6} - U_{a_5}} = \frac{40,9 \text{ мА} - 32,4 \text{ мА}}{12 \text{ В} - 10 \text{ В}} = 4,25 \frac{\text{мА}}{\text{В}} \\ S_6 &= \frac{I_{a_7} - I_{a_6}}{U_{a_7} - U_{a_6}} = \frac{49,94 \text{ мА} - 40,9 \text{ мА}}{14 \text{ В} - 12 \text{ В}} = 4,52 \frac{\text{мА}}{\text{В}} \\ S_7 &= \frac{I_{a_8} - I_{a_7}}{U_{a_8} - U_{a_7}} = \frac{62,4 \text{ мА} - 49,94 \text{ мА}}{16 \text{ В} - 14 \text{ В}} = 6,23 \frac{\text{мА}}{\text{В}} \\ S_8 &= \frac{I_{a_9} - I_{a_8}}{U_{a_9} - U_{a_8}} = \frac{73,52 \text{ мА} - 62,4 \text{ мА}}{18 \text{ В} - 16 \text{ В}} = 5,56 \frac{\text{мА}}{\text{В}} \\ S_9 &= \frac{I_{a_{10}} - I_{a_9}}{U_{a_{10}} - U_{a_9}} = \frac{86,31 \text{ мА} - 73,52 \text{ мА}}{20 \text{ В} - 18 \text{ В}} = 6,40 \frac{\text{мА}}{\text{В}} \end{aligned}$$

Приложение 2. Вычисление погрешности постоянного тока I_a

$$\begin{aligned} \Delta I_{\text{пр}_1} &= 0,002 I_{a_1} + 0,02 = 0,002 \times 3,78 \text{ мА} + 0,02 = 0,03 \text{ мА} \\ \Delta I_{\text{пр}_2} &= 0,002 I_{a_2} + 0,02 = 0,002 \times 10,16 \text{ мА} + 0,02 = 0,04 \text{ мА} \\ \Delta I_{\text{пр}_3} &= 0,002 I_{a_3} + 0,02 = 0,002 \times 16,88 \text{ мА} + 0,02 = 0,05 \text{ мА} \\ \Delta I_{\text{пр}_4} &= 0,002 I_{a_4} + 0,02 = 0,002 \times 24,84 \text{ мА} + 0,02 = 0,07 \text{ мА} \\ \Delta I_{\text{пр}_5} &= 0,002 I_{a_5} + 0,02 = 0,002 \times 32,4 \text{ мА} + 0,02 = 0,08 \text{ мА} \\ \Delta I_{\text{пр}_6} &= 0,002 I_{a_6} + 0,02 = 0,002 \times 40,9 \text{ мА} + 0,02 = 0,10 \text{ мА} \\ \Delta I_{\text{пр}_7} &= 0,002 I_{a_7} + 0,02 = 0,002 \times 49,94 \text{ мА} + 0,02 = 0,12 \text{ мА} \\ \Delta I_{\text{пр}_8} &= 0,002 I_{a_8} + 0,02 = 0,002 \times 62,4 \text{ мА} + 0,02 = 0,14 \text{ мА} \\ \Delta I_{\text{пр}_9} &= 0,002 I_{a_9} + 0,02 = 0,002 \times 73,52 \text{ мА} + 0,02 = 0,17 \text{ мА} \\ \Delta I_{\text{пр}_{10}} &= 0,002 I_{a_{10}} + 0,02 = 0,002 \times 86,31 \text{ мА} + 0,02 = 0,19 \text{ мА} \end{aligned}$$

Приложение 3. Вычисление погрешности напряжения U_a

$$\begin{aligned} \Delta U_{\text{пр}_1} &= 0,005 U_{a_1} + 0,299 = 0,005 \times 2 \text{ В} + 0,299 = 0,31 \text{ В} \\ \Delta U_{\text{пр}_2} &= 0,005 U_{a_2} + 0,299 = 0,005 \times 4 \text{ В} + 0,299 = 0,32 \text{ В} \\ \Delta U_{\text{пр}_3} &= 0,005 U_{a_3} + 0,299 = 0,005 \times 6 \text{ В} + 0,299 = 0,33 \text{ В} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Delta U_{\text{np}4} &= 0,005U_{a4} + 0,299 = 0,005 \times 8 \text{ В} + 0,299 = 0,34 \text{ В} \\
\Delta U_{\text{np}5} &= 0,005U_{a5} + 0,299 = 0,005 \times 10 \text{ В} + 0,299 = 0,35 \text{ В} \\
\Delta U_{\text{np}6} &= 0,005U_{a6} + 0,299 = 0,005 \times 12 \text{ В} + 0,299 = 0,36 \text{ В} \\
\Delta U_{\text{np}7} &= 0,005U_{a7} + 0,299 = 0,005 \times 14 \text{ В} + 0,299 = 0,37 \text{ В} \\
\Delta U_{\text{np}8} &= 0,005U_{a8} + 0,299 = 0,005 \times 16 \text{ В} + 0,299 = 0,38 \text{ В} \\
\Delta U_{\text{np}9} &= 0,005U_{a9} + 0,299 = 0,005 \times 18 \text{ В} + 0,299 = 0,39 \text{ В} \\
\Delta U_{\text{np}10} &= 0,005U_{a10} + 0,299 = 0,005 \times 20 \text{ В} + 0,299 = 0,40 \text{ В}
\end{aligned}$$

Приложение 4. Вычисление конвенной погрешности S

$$\begin{aligned}
\Delta S_1 &= \frac{\sqrt{(I_{a2}-I_{a1})^2(\Delta U_{a1}^2+\Delta U_{a2}^2)+(U_{a2}-U_{a1})^2(\Delta I_{a1}^2+\Delta I_{a2}^2)}}{(U_{a2}-U_{a1})^2} = \\
&= \frac{\sqrt{(0,03\text{мА}^2+0,04\text{мА}^2)(4,0\text{В}-2,0\text{В})^2+(0,31\text{В}^2+0,32\text{В}^2)(10,16\text{мА}-3,78\text{мА})^2}}{(4,0\text{В}-2,0\text{В})^2} = 0,71 \frac{\text{мА}}{\text{В}}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Delta S_2 &= \frac{\sqrt{(I_{a3}-I_{a2})^2(\Delta U_{a2}^2+\Delta U_{a3}^2)+(U_{a3}-U_{a2})^2(\Delta I_{a2}^2+\Delta I_{a3}^2)}}{(U_{a3}-U_{a2})^2} = \\
&= \frac{\sqrt{(0,04\text{мА}^2+0,05\text{мА}^2)(6,0\text{В}-4,0\text{В})^2+(0,32\text{В}^2+0,33\text{В}^2)(16,88\text{мА}-10,16\text{мА})^2}}{(6,0\text{В}-4,0\text{В})^2} = 0,77 \frac{\text{мА}}{\text{В}}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Delta S_3 &= \frac{\sqrt{(I_{a4}-I_{a3})^2(\Delta U_{a3}^2+\Delta U_{a4}^2)+(U_{a4}-U_{a3})^2(\Delta I_{a3}^2+\Delta I_{a4}^2)}}{(U_{a4}-U_{a3})^2} = \\
&= \frac{\sqrt{(0,05\text{мА}^2+0,07\text{мА}^2)(8,0\text{В}-6,0\text{В})^2+(0,33\text{В}^2+0,34\text{В}^2)(24,84\text{мА}-16,88\text{мА})^2}}{(8,0\text{В}-6,0\text{В})^2} = 0,94 \frac{\text{мА}}{\text{В}}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Delta S_4 &= \frac{\sqrt{(I_{a5}-I_{a4})^2(\Delta U_{a4}^2+\Delta U_{a5}^2)+(U_{a5}-U_{a4})^2(\Delta I_{a4}^2+\Delta I_{a5}^2)}}{(U_{a5}-U_{a4})^2} = \\
&= \frac{\sqrt{(0,07\text{мА}^2+0,08\text{мА}^2)(10,0\text{В}-8,0\text{В})^2+(0,34\text{В}^2+0,35\text{В}^2)(32,4\text{мА}-24,84\text{мА})^2}}{(10,0\text{В}-8,0\text{В})^2} = 0,92 \frac{\text{мА}}{\text{В}}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Delta S_5 &= \frac{\sqrt{(I_{a6}-I_{a5})^2(\Delta U_{a5}^2+\Delta U_{a6}^2)+(U_{a6}-U_{a5})^2(\Delta I_{a5}^2+\Delta I_{a6}^2)}}{(U_{a6}-U_{a5})^2} = \\
&= \frac{\sqrt{(0,08\text{мА}^2+0,1\text{мА}^2)(12,0\text{В}-10,0\text{В})^2+(0,35\text{В}^2+0,36\text{В}^2)(40,9\text{мА}-32,4\text{мА})^2}}{(12,0\text{В}-10,0\text{В})^2} = 1,07 \frac{\text{мА}}{\text{В}}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Delta S_6 &= \frac{\sqrt{(I_{a7}-I_{a6})^2(\Delta U_{a6}^2+\Delta U_{a7}^2)+(U_{a7}-U_{a6})^2(\Delta I_{a6}^2+\Delta I_{a7}^2)}}{(U_{a7}-U_{a6})^2} = \\
&= \frac{\sqrt{(0,1\text{мА}^2+0,12\text{мА}^2)(14,0\text{В}-12,0\text{В})^2+(0,36\text{В}^2+0,37\text{В}^2)(49,94\text{мА}-40,9\text{мА})^2}}{(14,0\text{В}-12,0\text{В})^2} = 1,17 \frac{\text{мА}}{\text{В}}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Delta S_7 &= \frac{\sqrt{(I_{a8}-I_{a7})^2(\Delta U_{a7}^2+\Delta U_{a8}^2)+(U_{a8}-U_{a7})^2(\Delta I_{a7}^2+\Delta I_{a8}^2)}}{(U_{a8}-U_{a7})^2} = \\
&= \frac{\sqrt{(0,12\text{мА}^2+0,14\text{мА}^2)(16,0\text{В}-14,0\text{В})^2+(0,37\text{В}^2+0,38\text{В}^2)(62,4\text{мА}-49,94\text{мА})^2}}{(16,0\text{В}-14,0\text{В})^2} = 1,65 \frac{\text{мА}}{\text{В}}
\end{aligned}$$

$$\Delta S_8 = \frac{\sqrt{(I_{a9}-I_{a8})^2(\Delta U_{a8}^2+\Delta U_{a9}^2)+(U_{a9}-U_{a8})^2(\Delta I_{a8}^2+\Delta I_{a9}^2)}}{(U_{a9}-U_{a8})^2} =$$

$$= \frac{\sqrt{(0,14\text{мА}^2+0,17\text{мА}^2)(18,0\text{В}-16,0\text{В})^2+(0,38\text{В}^2+0,39\text{В}^2)(73,52\text{мА}-62,4\text{мА})^2}}{(18,0\text{В}-16,0\text{В})^2} = 1,52 \frac{\text{мА}}{\text{В}}$$

$$\Delta S_9 = \frac{\sqrt{(I_{a10}-I_{a9})^2(\Delta U_{a10}^2+\Delta U_{a9}^2)+(U_{a10}-U_{a9})^2(\Delta I_{a10}^2+\Delta I_{a9}^2)}}{(U_{a10}-U_{a9})^2} =$$

$$= \frac{\sqrt{(0,17\text{мА}^2+0,19\text{мА}^2)(20,0\text{В}-18,0\text{В})^2+(0,39\text{В}^2+0,4\text{В}^2)(86,31\text{мА}-73,52\text{мА})^2}}{(20,0\text{В}-18,0\text{В})^2} = 1,79 \frac{\text{мА}}{\text{В}}$$

Приложение 5. Вычисление параметра В

$$B = \frac{I_{a1}U_{a1}^{1,5}+...+I_{a10}U_{a10}^{1,5}}{U_{a1}^3+...+U_{a10}^3} =$$

$$= \frac{10,2 \text{ мА} \cdot (4 \text{ В})^{1,5} + 16,9 \text{ мА} \cdot (6 \text{ В})^{1,5} + 24,8 \text{ мА} \cdot (8 \text{ В})^{1,5} + 3,8 \text{ мА} \cdot (2 \text{ В})^{1,5} + 32,4 \text{ мА} \cdot (10 \text{ В})^{1,5} +}{(10 \text{ В})^3 + (12 \text{ В})^3 + (14 \text{ В})^3 + (16 \text{ В})^3 + (18 \text{ В})^3 + (20 \text{ В})^3 + (2 \text{ В})^3 + (4 \text{ В})^3 + (6 \text{ В})^3 + (8 \text{ В})^3} +$$

$$+ \frac{40,9 \text{ мА} \cdot (12 \text{ В})^{1,5} + 49,9 \text{ мА} \cdot (14 \text{ В})^{1,5} + 62,4 \text{ мА} \cdot (16 \text{ В})^{1,5} + 73,5 \text{ мА} \cdot (18 \text{ В})^{1,5} + 86,3 \text{ мА} \cdot (20 \text{ В})^{1,5}}{(10 \text{ В})^3 + (12 \text{ В})^3 + (14 \text{ В})^3 + (16 \text{ В})^3 + (18 \text{ В})^3 + (20 \text{ В})^3 + (2 \text{ В})^3 + (4 \text{ В})^3 + (6 \text{ В})^3 + (8 \text{ В})^3} =$$

$$= 0,97 \frac{\text{мА}}{\text{В}^{3/2}}$$

Приложение 6. Вычисление коэффициента усиления K

$$K_1 = \frac{2U_{\text{ВЫХ}0}}{2U_{\text{ВХ}}} = \frac{0,36 \text{ В}}{0,2 \text{ В}} = 1,80 \quad K_7 = \frac{2U_{\text{ВЫХ}6}}{2U_{\text{ВХ}}} = \frac{0,352 \text{ В}}{0,2 \text{ В}} = 1,76 \quad K_{13} = \frac{2U_{\text{ВЫХ}12}}{2U_{\text{ВХ}}} = \frac{0,288 \text{ В}}{0,2 \text{ В}} = 1,44$$

$$K_2 = \frac{2U_{\text{ВЫХ}1}}{2U_{\text{ВХ}}} = \frac{0,352 \text{ В}}{0,2 \text{ В}} = 1,76 \quad K_8 = \frac{2U_{\text{ВЫХ}7}}{2U_{\text{ВХ}}} = \frac{0,352 \text{ В}}{0,2 \text{ В}} = 1,76 \quad K_{14} = \frac{2U_{\text{ВЫХ}13}}{2U_{\text{ВХ}}} = \frac{0,272 \text{ В}}{0,2 \text{ В}} = 1,36$$

$$K_3 = \frac{2U_{\text{ВЫХ}2}}{2U_{\text{ВХ}}} = \frac{0,356 \text{ В}}{0,2 \text{ В}} = 1,78 \quad K_9 = \frac{2U_{\text{ВЫХ}8}}{2U_{\text{ВХ}}} = \frac{0,344 \text{ В}}{0,2 \text{ В}} = 1,72 \quad K_{15} = \frac{2U_{\text{ВЫХ}14}}{2U_{\text{ВХ}}} = \frac{0,254 \text{ В}}{0,2 \text{ В}} = 1,27$$

$$K_4 = \frac{2U_{\text{ВЫХ}3}}{2U_{\text{ВХ}}} = \frac{0,348 \text{ В}}{0,2 \text{ В}} = 1,74 \quad K_{10} = \frac{2U_{\text{ВЫХ}9}}{2U_{\text{ВХ}}} = \frac{0,344 \text{ В}}{0,2 \text{ В}} = 1,72 \quad K_{16} = \frac{2U_{\text{ВЫХ}15}}{2U_{\text{ВХ}}} = \frac{0,24 \text{ В}}{0,2 \text{ В}} = 1,20$$

$$K_5 = \frac{2U_{\text{ВЫХ}4}}{2U_{\text{ВХ}}} = \frac{0,352 \text{ В}}{0,2 \text{ В}} = 1,76 \quad K_{11} = \frac{2U_{\text{ВЫХ}10}}{2U_{\text{ВХ}}} = \frac{0,336 \text{ В}}{0,2 \text{ В}} = 1,68$$

$$K_6 = \frac{2U_{\text{ВЫХ}5}}{2U_{\text{ВХ}}} = \frac{0,352 \text{ В}}{0,2 \text{ В}} = 1,76 \quad K_{12} = \frac{2U_{\text{ВЫХ}11}}{2U_{\text{ВХ}}} = \frac{0,308 \text{ В}}{0,2 \text{ В}} = 1,54$$

Приложение 7. Вычисление приборной погрешности сигнала

$$\Delta \nu_1 = k_{\text{пр}1} \left(\frac{\nu_{\text{уст}1}}{50} + \frac{3}{10} \right) =$$

$$= 10^2 \left(\frac{10 \Gamma_{\Pi}}{50} + \frac{3}{10} \right) = 0,1 \text{ кГц}$$

$$\Delta \nu_5 = k_{\text{пр}5} \left(\frac{\nu_{\text{уст}5}}{50} + \frac{3}{10} \right) =$$

$$= 10^3 \left(\frac{70 \Gamma_{\Pi}}{50} + \frac{3}{10} \right) = 1,7 \text{ кГц}$$

$$\Delta \nu_2 = k_{\text{пр}2} \left(\frac{\nu_{\text{уст}2}}{50} + \frac{3}{10} \right) =$$

$$= 10^3 \left(\frac{20 \Gamma_{\Pi}}{50} + \frac{3}{10} \right) = 0,7 \text{ кГц}$$

$$\Delta \nu_6 = k_{\text{пр}6} \left(\frac{\nu_{\text{уст}6}}{50} + \frac{3}{10} \right) =$$

$$= 10^3 \left(\frac{90 \Gamma_{\Pi}}{50} + \frac{3}{10} \right) = 2,1 \text{ кГц}$$

$$\Delta \nu_3 = k_{\text{пр}3} \left(\frac{\nu_{\text{уст}3}}{50} + \frac{3}{10} \right) =$$

$$= 10^3 \left(\frac{40 \Gamma_{\Pi}}{50} + \frac{3}{10} \right) = 1,1 \text{ кГц}$$

$$\Delta \nu_7 = k_{\text{пр}7} \left(\frac{\nu_{\text{уст}7}}{50} + \frac{3}{10} \right) =$$

$$= 10^4 \left(\frac{12 \Gamma_{\Pi}}{50} + \frac{3}{10} \right) = 5,4 \text{ кГц}$$

$$\Delta \nu_4 = k_{\text{пр}4} \left(\frac{\nu_{\text{уст}4}}{50} + \frac{3}{10} \right) =$$

$$= 10^3 \left(\frac{50 \Gamma_{\Pi}}{50} + \frac{3}{10} \right) = 1,3 \text{ кГц}$$

$$\Delta \nu_8 = k_{\text{пр}8} \left(\frac{\nu_{\text{уст}8}}{50} + \frac{3}{10} \right) =$$

$$= 10^4 \left(\frac{14 \Gamma_{\Pi}}{50} + \frac{3}{10} \right) = 5,8 \text{ кГц}$$

$$\begin{aligned}\Delta\nu_9 &= k_{\text{np } 9} \left(\frac{\nu_{\text{yct } 9}}{50} + \frac{3}{10} \right) = \\ &= 10^4 \left(\frac{18\Gamma_{\text{H}}}{50} + \frac{3}{10} \right) = 6,6 \text{ кГц}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta\nu_{13} &= k_{\text{np } 13} \left(\frac{\nu_{\text{yct } 13}}{50} + \frac{3}{10} \right) = \\ &= 10^4 \left(\frac{60\Gamma_{\text{H}}}{50} + \frac{3}{10} \right) = 15,0 \text{ кГц}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta\nu_{10} &= k_{\text{np } 10} \left(\frac{\nu_{\text{yct } 10}}{50} + \frac{3}{10} \right) = \\ &= 10^4 \left(\frac{23\Gamma_{\text{H}}}{50} + \frac{3}{10} \right) = 7,6 \text{ кГц}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta\nu_{14} &= k_{\text{np } 14} \left(\frac{\nu_{\text{yct } 14}}{50} + \frac{3}{10} \right) = \\ &= 10^4 \left(\frac{70\Gamma_{\text{H}}}{50} + \frac{3}{10} \right) = 17,0 \text{ кГц}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta\nu_{11} &= k_{\text{np } 11} \left(\frac{\nu_{\text{yct } 11}}{50} + \frac{3}{10} \right) = \\ &= 10^4 \left(\frac{27\Gamma_{\text{H}}}{50} + \frac{3}{10} \right) = 8,4 \text{ кГц}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta\nu_{15} &= k_{\text{np } 15} \left(\frac{\nu_{\text{yct } 15}}{50} + \frac{3}{10} \right) = \\ &= 10^4 \left(\frac{80\Gamma_{\text{H}}}{50} + \frac{3}{10} \right) = 19,0 \text{ кГц}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta\nu_{12} &= k_{\text{np } 12} \left(\frac{\nu_{\text{yct } 12}}{50} + \frac{3}{10} \right) = \\ &= 10^4 \left(\frac{50\Gamma_{\text{H}}}{50} + \frac{3}{10} \right) = 13,0 \text{ кГц}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta\nu_{16} &= k_{\text{np } 16} \left(\frac{\nu_{\text{yct } 16}}{50} + \frac{3}{10} \right) = \\ &= 10^4 \left(\frac{90\Gamma_{\text{H}}}{50} + \frac{3}{10} \right) = 21,0 \text{ кГц}\end{aligned}$$