

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

Содержание

I. Введение	3
Цель	3
Задачи	3
Приборы и оборудование	3
II. Теоретическая часть	5
1. Диод	5
2. Триод	6
3. Вывод закона З/2 Ленгмюра	8
3.1 Связь динамической и статической крутизны	10
4. Обработка и построение графиков	11
4.1 Аппроксимация теоретического графика крутизны S	11
5. Вычисление погрешностей	11
5.1 Приборная погрешность источника питания постоянного тока Б5-50	11
5.2 Приборная погрешность ГДМ-8245 при измерении постоянного тока	12
5.3 Косвенная погрешность крутизны S	12
5.4 Приборная погрешность генератора низкочастотных сигналов ГЗ-112	12
5.5 Вычисление косвенной погрешности коэффициента K	13
III. Практическая часть	14
1. Исследование лампы диода	14
1.1 Снятие статической характеристики диода	14
2. Исследование лампы триода	17
2.1 Расчет предельной мощности	17
2.2 Снятие анодной характеристики	18
2.3 Снятие сеточной характеристики	19
3. Определение коэффициента усиления усилителя	21
3.1 Изучение АЧХ усилителя	21
3.2 Зависимость усиления от сопротивления нагрузки	21
IV. Вывод	25
V. Контрольные вопросы	26
VI. Приложение	29
Приложение 1. Вычисление величины крутизны S	29
Приложение 2. Вычисление погрешности постоянного тока I_a	29
Приложение 3. Вычисление погрешности напряжения U_a	29
Приложение 4. Вычисление консвенной погрешности S	29
Приложение 5. Вычисление параметра B	30
Приложение 6. Вычисление коэффициента усиления K	30
Приложение 7. Вычисление приборной погрешности сигнала	30

Приложение 8. Вычисление погрешности анодного напряжения при измерении анодной характеристики триода	31
Приложение 9. Вычисление погрешности анодного тока при измерении анодной характеристики триода	31

I. ВВЕДЕНИЕ

Цель

Исследовать устройство электронных ламп диода и триода.

Задачи

1. *Снятие статической характеристики диода:*
 - а) Меняя величину U_a для каждого ее конкретного значения считывать величину I_a ;
 - б) По полученным данным построить соответствующую характеристику и вычислить крутизну в нескольких точках характеристики.
2. *Снятие статических характеристик триода:*
 - а) Начертить график гиперболы $P_a^{max} = U_a I_a = const$, чтобы при снятии характеристик рассеиваемая мощность не превышала предельную допустимую для данной лампы;
 - б) Снять семейство анодных характеристик при нескольких значениях сеточного напряжения;
 - в) Снять семейство сеточных характеристик при различных анодных напряжениях, изменяя U_c , чтобы лампа запиралась в одном положении и анодный ток был ниже максимально допустимого в другом;
 - г) Для средних участков характеристик вычислить параметры S , R_i , μ .
3. *Определение коэффициента усиления усилителя:*
 - а) Подать на вход осциллографа сигнал с выхода генератора Г3-112 с частотой $f \sim 1$ кГц и амплитудой ~ 100 мВ;
 - б) Вычислить величину
$$S_d = \frac{S_i}{1 + \frac{R_i}{R_a}}, \quad (1)$$
определив по осциллограмме амплитуду выходного сигнала;
 - в) Проверить частотные свойства усилителя. Снять зависимость коэффициента усиления от частоты. Определить частоту, на которой коэффициент усиления уменьшается в 2 раза;
 - г) Вычислить K для всех возможных значений сопротивления R_a . Проверить, выполняется ли соотношение (1). Если указанное соотношение не выполняется, то объясните, чем это может быть вызвано.

Приборы и оборудование

1. Источник питания постоянного тока Б5-50;
2. Вольтметр универсальный GDM-8245;
3. Генератор низкочастотных сигналов Г3-112;
4. Провода;
5. Осциллограф цифровой GDS-71022;

6. Диод и триод.

II. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1. Диод

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*).

Если соединить анод с катодом через чувствительный гальванометр, то можно обнаружить в этой цепи анодный ток, величина определённая электрическая мощность. Электроны, излучаемые катодом, увеличивают свою кинетическую энергию за счет энергии электрического поля. При ударе об анод электрон отдаёт 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

$$P_a = U_a I_a \quad (2)$$

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

$$S = \frac{dI_a}{dU_a}, \quad (3)$$

измеряемая обычно в $\frac{\text{mA}}{\text{В}}$ или обратная ей величина – внутренне 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

$$S \approx \frac{\Delta I_a}{\Delta U_a} \quad (4)$$

2. Триод

В триоде помимо катода и анода имеется еще один электрод – управляющая сетка, расположенная вблизи катода между катодом и анодом. Конструктивно сетка выполняется в виде металлической проволочной спирали. 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 u , следовательно, увеличивает I_e ; при $U_c < 0$ поле между сеткой и катодом оказывает тормозящее действие на электроны u и уменьшает I_e . Таким образом наличие сетки в лампе позволяет управлять величиной анодного тока. Обычно используют тормозящее действие сетки, т. е. работают при $U_c < 0$, так как при этом сеточный ток отсутствует, и в цепи сетки для управления анодным током не затрачивается никакой мощности.

В триоде анодный ток зависит как от напряжения на сетке, так и от напряжения на аноде $I_a = f(U_c, U_d)$. Эта зависимость (при постоянной температуре катода $T_h = \text{const}$) изображается обычно в виде двух семейств статических характеристик (статическими они называются потому, что снимаются на постоянном токе)

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

— статические анодно-сеточные характеристики, которые представлены на рис.3.

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

— статические анодные характеристики, изображенные на рис.4.

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

Анодный ток I_a меняется нелинейно как с изменением U_c , так и с изменением U_a . Параметры

$$S = \frac{\partial I_a}{\partial U_c} = \left[\frac{dI_a}{dU_c} \right]_{U_a=\text{const}} \quad \text{и} \quad R_i = \frac{\partial U_a}{\partial I_a} = \left[\frac{\partial U_a}{\partial I_a} \right]_{U_c=\text{const}}$$

по аналогии с диодом называются соответственно крутизной и внутренним сопротивлением 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.

У существующих триодов S порядка нескольких десятков мА/В.

Внутреннее сопротивление графически может быть определено как котангенс угла наклона касательной к анодной характеристике в рабочей точке. У триода R_i принимает значения от нескольких единиц до нескольких десятков кОм. Практически значения S и R_i могут быть приближенно определены, как и для диода, через соответствующие приращения.

Параметры S и R_i изменяются в зависимости от действующих напряжений на электродах триода. Найдем связь между этими параметрами, вычисляя полный дифференциал функции $I_a = f(U_c, U_a)$:

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

Если U_c и U_a изменять так, чтобы анодный ток I_a оставался постоянным, т. е. $dI_a = 0$, то, учитывая, что изменения сеточного и анодного напряжения при этом различного знака, получим

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

где μ — статический коэффициент усиления.

3. 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 $x = 0 : U_k = 0$, 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 трубы от катода к аноду.

Используем одно из уравнений Maxwella в дифференциальной форме:

$$\operatorname{div} E = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

где ρ — объёмная плотность заряда. Спроектируем это уравнение на ось x :

$$\frac{\partial E}{\partial x} = -\frac{1}{\epsilon_0} en \quad (5)$$

Знак минус учитывает, что эмиттируемые электроны имеют отрицательный заряд, ϵ_0 — электрическая постоянная, n — концентрация электронов, E — напряжённость 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:

$$E_x = -\frac{dU}{dx} \quad (6)$$

Выразим напряжённость E через потенциал U , с помощью формулы (6). Заряд можно представить как количество элементарных зарядов (электронов) или заряд электрона на концентрацию в объёме:

$$q = eN = enV$$

С другой стороны объёмная плотность заряда равна:

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

Тогда получаем, что объёмная плотность тока равна:

$$j = \rho u = enu$$

Концентрацию выразим через объёмную плотность тока, а скорость электронов —

из закона сохранения энергии: $mu^2/2 = eU$:

$$n = \frac{j}{eu} \quad (7)$$

$$u = \sqrt{\frac{2eU}{m}} \quad (8)$$

Тогда уравнение (5) с учётом (6–8) принимает вид:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} \frac{dU}{dx} &= -\frac{1}{\mathcal{E}_0} e \frac{j}{e} \sqrt{\frac{m}{2eU}} \\ \frac{d^2U}{dx^2} &= \frac{j}{\mathcal{E}_0} \sqrt{\frac{m}{2e}} U^{-\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (9)$$

Решение дифференциального уравнения второго порядка (9) будем искать при граничных условиях $\lim_{x \rightarrow 0} U = \lim_{x \rightarrow 0} E = 0$. Если бы электрическое поле на границе катода было больше нуля, то все электроны, испускаемые катодом, увлекались бы этим полем к аноду, и термоэлектронный ток достигал бы насыщения при любых напряжениях на вакуумной трубке. Коэффициент перед $U^{-1/2}$ обозначим за a :

$$\frac{d^2U}{dx^2} = a^2 U^{-\frac{1}{2}}, \quad a^2 = \frac{j}{\mathcal{E}_0} \sqrt{\frac{m}{2e}} \quad (10)$$

Введём замену:

$$p = \frac{dU}{dx}, \quad \frac{d^2U}{dx^2} = p \frac{dp}{dU}$$

Тогда, учитывая, что $x = 0 : U_k = 0, dU/dx = 0$, получаем:

$$\begin{aligned} p \frac{dp}{dU} &= a^2 U^{-\frac{1}{2}} \\ pdp &= a^2 U^{-\frac{1}{2}} dU \\ \frac{p^2}{2} &= 2a^2 U^{\frac{1}{2}} \\ p &= 2a U^{\frac{1}{4}} \\ \frac{dU}{U^{1/4}} &= 2adx \\ \frac{4}{3} U^{\frac{3}{4}} &= 2ax \\ a &= \frac{2U^{3/4}}{3x} \end{aligned} \quad (11)$$

Подставим (11) в (10) и полагая, что $x = l$, где l - расстояние между анодом и

катодом, получаем:

$$j = \frac{4\mathcal{E}_0}{9l^2} \sqrt{\frac{2e}{m}} U^{\frac{3}{2}} \quad (12)$$

Учитывая, что коэффициент перед U – константа, зависящая только от геометрических свойств прибора и фундаментальных постоянных(обозначим её B), то уравнение (12) можно переписать в виде:

$$j = BU^{3/2} \quad (13)$$

3.1 Связь динамической и статической крутизны

По определению, коэффициенты крутизны – статический S_i и динамический S_d , а так же внутренние сопротивление триода R_i запишутся как

$$S_d = \frac{dI_a}{dU_c} \quad R_i = \frac{dU_a}{dI_a} \quad S_i = \frac{\partial I_a}{\partial U_c} \quad (14)$$

Из закона Ома для цепи источника анода следует

$$U_a = \mathcal{E}_a - I_a R_a \quad (15)$$

Тогда дифференциал U_a будет

$$dU_a = -dI_a R_a \quad (16)$$

Из формулы (15) можно выразить анодный ток

$$I_a = \frac{\mathcal{E}_a}{R_a} - \frac{U_a}{R_a} \quad (17)$$

И найти его полный дифференциал:

$$dI_a = \frac{\partial I_a}{\partial U_c} dU_c + \frac{\partial I_a}{\partial U_a} dU_a = S_i dU_c + \frac{1}{R_i} dU_a \quad (18)$$

Тогда после несложных преобразований

$$\frac{dI_a}{dU_c} = S_i + \frac{1}{R_i} \frac{dU_a}{dU_c} = S_i - \frac{R_a}{R_i} \frac{dI_a}{dU_c} = S_i - \frac{R_a}{R_i} S_d \quad (19)$$

И окончательный результат

$$S_d \left[1 + \frac{R_a}{R_i} \right] = S_i \quad (20)$$

$$S_d = \frac{S_i}{1 + \frac{R_a}{R_i}} \quad (21)$$

4. Обработка и построение графиков

4.1 Аппроксимация теоретического графика крутизны S

Из формулы закона трех вторых (13) мы имеем *степенную зависимость* данных. Для построения теоретического графика заменим переменные тока и напряжения на оси x ($x = U_a$) и $y = I_a$:

$$y = Bx^{3/2} \quad (22)$$

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.

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial B} &= \sum_{i=1}^n 2 \left(Bx_i^{\frac{3}{2}} - y_i \right) x_i^{\frac{3}{2}} = 2 \sum_{i=1}^n \left(Bx_i^3 - y_i x_i^{\frac{3}{2}} \right) \quad \frac{\partial S}{\partial B} = 0 \\ B \sum_{i=1}^n x_i^3 &= \sum_{i=1}^n y_i x_i^{\frac{3}{2}} \\ B &= \frac{\sum_{i=1}^n y_i x_i^{\frac{3}{2}}}{\sum_{i=1}^n x_i^3} \end{aligned} \quad (23)$$

5. Вычисление погрешностей

5.1 Приборная погрешность источника питания постоянного тока Б5-50

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

$$\Delta U_{\text{приб}} = \pm(0,5\%U + 0,1\%U_{\text{макс}}), \quad (24)$$

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:

$$\Delta U_{\text{приб}} = 0,005U + \frac{299}{1000} \text{ В} \quad (25)$$

5.2 Приборная погрешность GDM-8245 при измерении постоянного тока

Приборная погрешность GDM-8245 при измерении постоянного тока:

$$\boxed{\Delta I_{\text{приб}} = \pm(0,002 \cdot I + 2 \cdot dI)} \quad (26)$$

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

5.3 Косвенная погрешность крутизны S

Выведем формулу косвенной погрешности крутизны из формулы (4):

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

$$\Delta S = \sqrt{\left(\frac{\partial S}{\partial I_{a_1}} \Delta I_{a_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial S}{\partial I_{a_2}} \Delta I_{a_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial S}{\partial U_{a_1}} \Delta U_{a_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial S}{\partial U_{a_2}} \Delta U_{a_2}\right)^2} \quad (27)$$

$$\Delta S =$$

$$\begin{aligned} &= \sqrt{\frac{\Delta I_{a_1}^2}{(U_{a_2} - U_{a_1})^2} + \frac{\Delta I_{a_2}^2}{(U_{a_2} - U_{a_1})^2} + \frac{(I_{a_2} - I_{a_1})^2}{(U_{a_2} - U_{a_1})^4} \Delta U_{a_1}^2 + \frac{(I_{a_2} - I_{a_1})^2}{(U_{a_2} - U_{a_1})^4} \Delta U_{a_2}^2} = \\ &= \boxed{\frac{\sqrt{(\Delta I_{a_1}^2 + \Delta I_{a_2}^2)(U_{a_2} - U_{a_1})^2} + (\Delta U_{a_1}^2 + \Delta U_{a_2}^2)(I_{a_2} - I_{a_1})^2}{(U_{a_2} - U_{a_1})^2}} \end{aligned} \quad (28)$$

5.4 Приборная погрешность генератора низкочастотных сигналов ГЗ-112

Относительная приборная погрешность ГЗ-112 при создании сигнала ν :

$$\Delta \nu_{\text{пр}} = \pm\left(2 + \frac{30}{\nu_{\text{уст}}}\right)\% \quad (29)$$

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

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

где k — значение множителя на генераторе.

5.5 Вычисление косвенной погрешности коэффициента K

Выведем формулу косвенной погрешности крутизны из формулы (36):

$$K = \frac{2U_{\text{вых}}}{2U_{\text{вх}}}$$

$$\Delta K = \sqrt{\left(\frac{\partial K}{\partial 2U_{\text{вых}}} \Delta 2U_{\text{вых}}\right)^2 + \left(\frac{\partial K}{\partial 2U_{\text{вх}}} \Delta 2U_{\text{вх}}\right)^2} \quad (31)$$

$$\Delta K = \sqrt{\frac{\Delta(2U_{\text{вых}})^2}{(2U_{\text{вх}})^2} + \frac{(2U_{\text{вых}})^2 \Delta(2U_{\text{вх}})^2}{(2U_{\text{вх}})^4}} \quad (32)$$

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

(а)		(б)			
U_a , В	I_a , мА	ΔU_a , В	ΔI_a , мА	$S, \frac{\text{мА}}{\text{В}}$	$\Delta S, \frac{\text{мА}}{\text{В}}$
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 (4) (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 (25) и (26) (см. прил. 2 и 3). Погрешность определения крутизны ΔS рассчитана по формуле (28) (см. прил. 4).

Определим среднеарифметическое конечных значений крутизны вольт-амперной характеристики:

$$S_{\text{cp}} = \frac{6,23 + 5,56 + 6,40}{3} \frac{\text{мА}}{\text{В}} \approx 6,06 \frac{\text{мА}}{\text{В}} \quad (33)$$

$$\Delta S_{\text{cp}} = \frac{1,65 + 1,52 + 1,79}{3} \frac{\text{мА}}{\text{В}} \approx 1,65 \frac{\text{мА}}{\text{В}} \quad (34)$$

$$S_{\text{cp}} = (6,06 \pm 1,65) \frac{\text{мА}}{\text{В}}$$

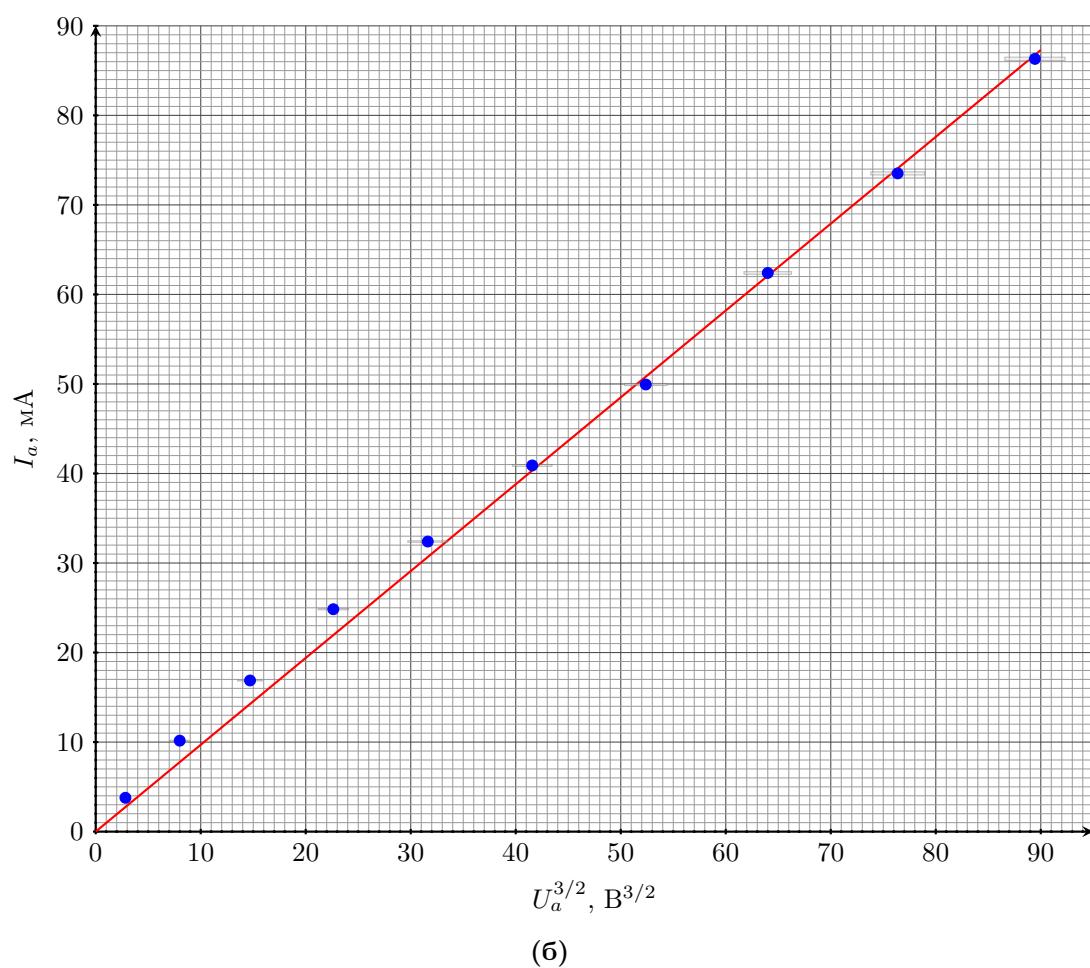
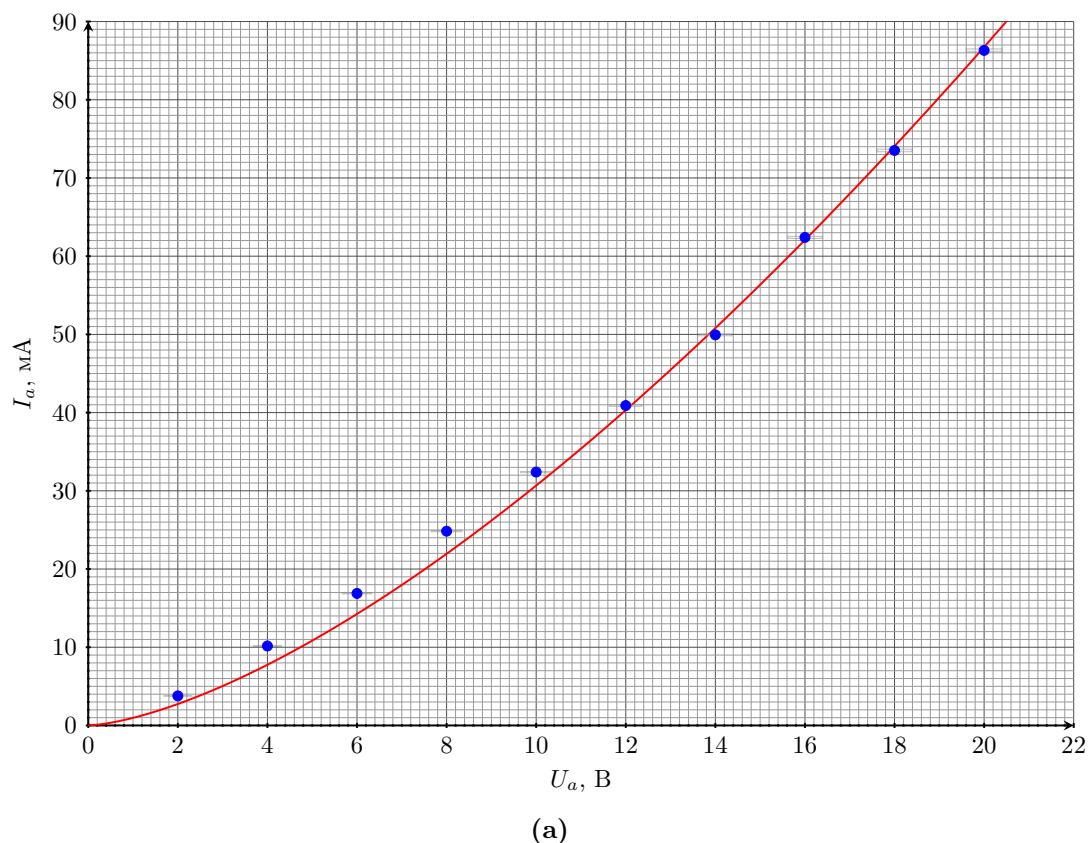


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика диода с погрешностями измерений и теоретической линией

На рис. 1а представлен график зависимости $I_a(U_a)$ с нанесенными экспериментальными точками и областями погрешностей измерений. Теоретическая кривая построена в соответствии с уравнением (23), из анализа которого определен параметр B (см. прил. 5):

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

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

В соответствии с максимальной рассеиваемой мощностью лампы рассчитали максимально допустимый ток для $U_a \in [10 : 240]$ В. Построим график гиперболы (Рис. 2).

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

$$I_a^{max} = \frac{P_{max}}{U_a} = \frac{2,5}{U_a} \text{ А} \quad (35)$$

Таблица 2. Максимальный допустимый ток

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

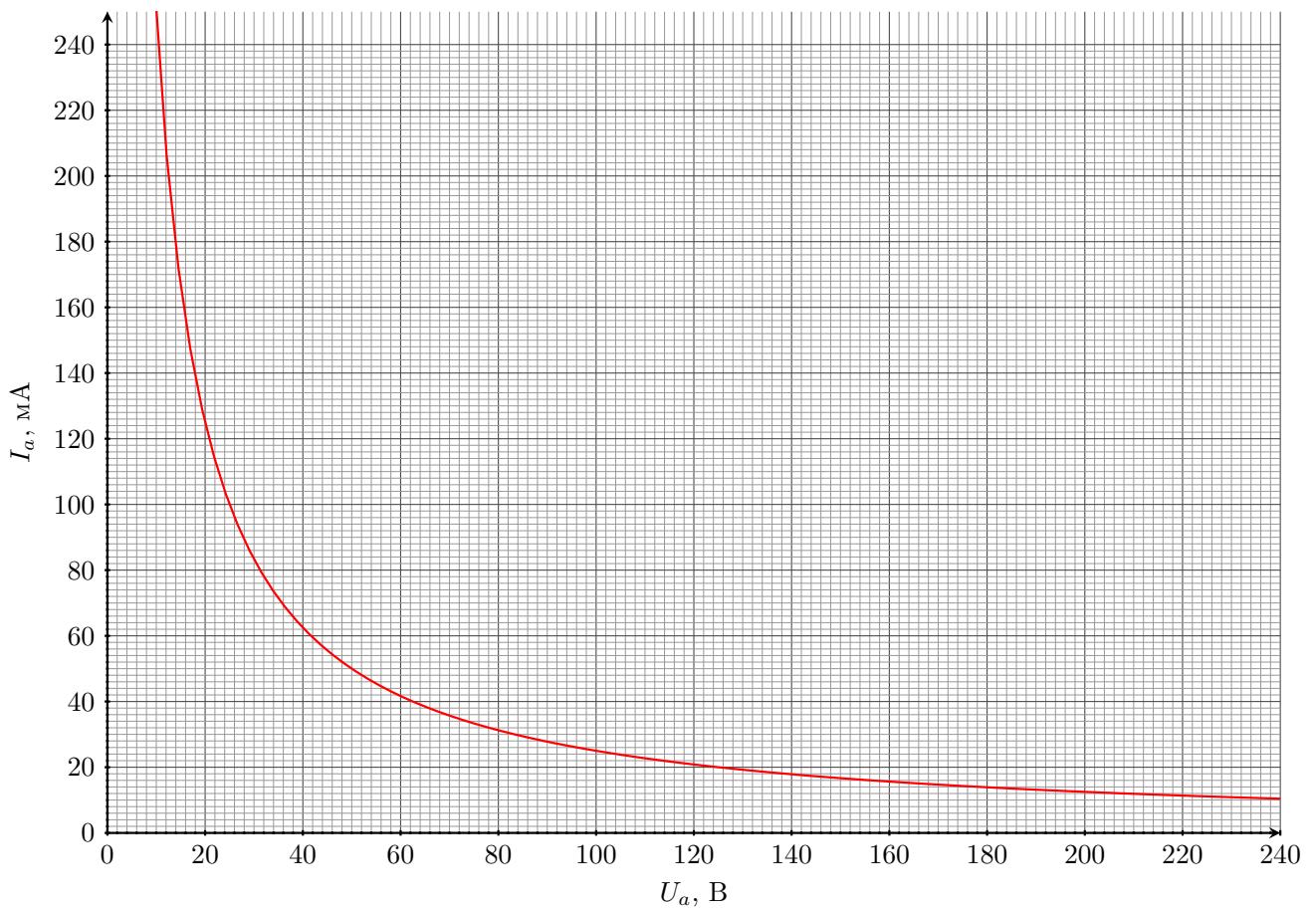


Рис. 2. Кривая максимально допустимого тока

2.2 Снятие анодной характеристики

Были сняты 4 анодные характеристики для разных напряжений на сетке U_c : -4, -2, 0, 2 вольт. Также вычислены их погрешности по формулам (25) и (26) (см. прил. 8 и 9) и записаны в табл. 3б.

Таблица 3. Снятие анодной характеристики триода

(а) Результаты измерений						(б) Погрешности данных табл. 3а				
U_a	I_a^{-4B}	I_a^{-2B}	I_a^{0B}	I_a^{2B}	I_a^{\max}	ΔU_a	ΔI_a^{-4B}	ΔI_a^{-2B}	ΔI_a^{0B}	ΔI_a^{2B}
B	mA	mA	mA	mA	mA	B	mA	mA	mA	mA
10	—	—	1,39	4,67	250,00	0,3	—	—	0,02	0,03
20	—	—	2,35	6,01	125,00	0,4	—	—	0,02	0,03
30	—	0,16	3,39	7,50	83,33	0,4	—	0,02	0,03	0,04
40	—	0,54	4,50	8,97	62,50	0,5	—	0,02	0,03	0,04
50	—	1,13	5,77	10,47	50,00	0,5	—	0,02	0,03	0,04
60	0,12	1,90	6,97	12,00	41,67	0,6	0,02	0,02	0,03	0,04
70	0,34	2,81	8,33	13,59	35,71	0,6	0,02	0,03	0,04	0,05
80	0,72	3,82	9,72	15,20	31,25	0,7	0,02	0,03	0,04	0,05
90	1,26	4,92	11,19	16,88	27,78	0,7	0,02	0,03	0,04	0,05
100	1,95	6,18	12,73	18,57	25,00	0,8	0,02	0,03	0,05	0,06
110	2,77	7,46	14,32	20,31	22,73	0,8	0,03	0,03	0,05	0,06
120	3,72	8,77	15,45	—	20,83	0,9	0,03	0,04	0,05	—
130	4,75	10,16	17,60	—	19,23	0,9	0,03	0,04	0,06	—
140	5,93	11,65	—	—	17,86	1,0	0,03	0,04	—	—
150	7,15	—	—	—	16,67	1,0	0,03	—	—	—
160	8,44	—	—	—	15,63	1,1	0,04	—	—	—
170	9,84	—	—	—	14,71	1,1	0,04	—	—	—
180	11,27	—	—	—	13,89	1,2	0,04	—	—	—

2.3 Снятие сеточной характеристики

Были сняты 3 анодно-сеточных характеристик для разных напряжений на аноде: 60, 80, 100 В (см. табл. 4).

Таблица 4. Анодно-сеточная характеристика триода

(а) $U_a = 60$ В		(б) $U_a = 80$ В		(в) $U_a = 100$ 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	—	—

Для каждой из характеристик подсчитали коэффициент

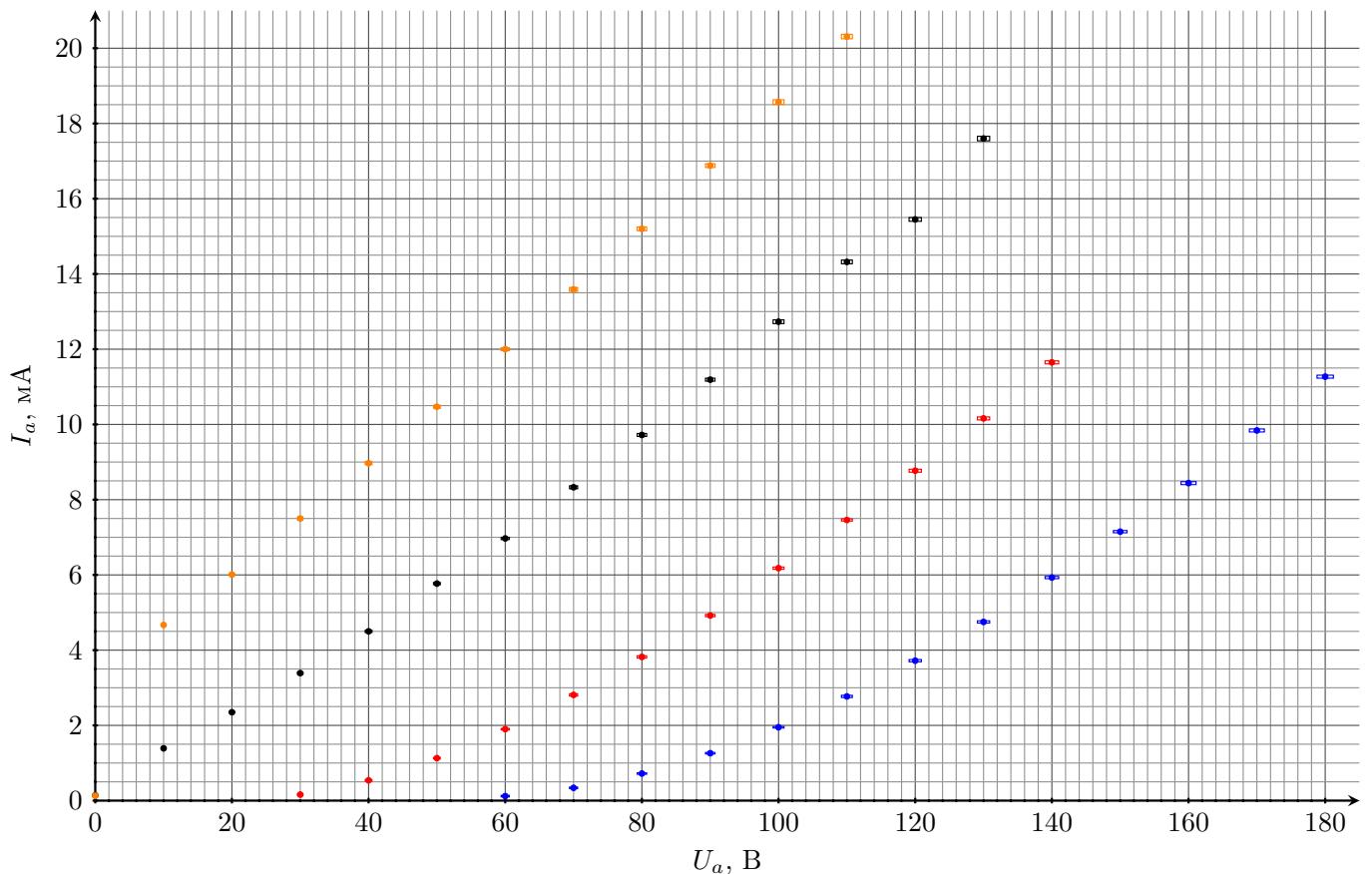


Рис. 3. Анодная характеристика триода

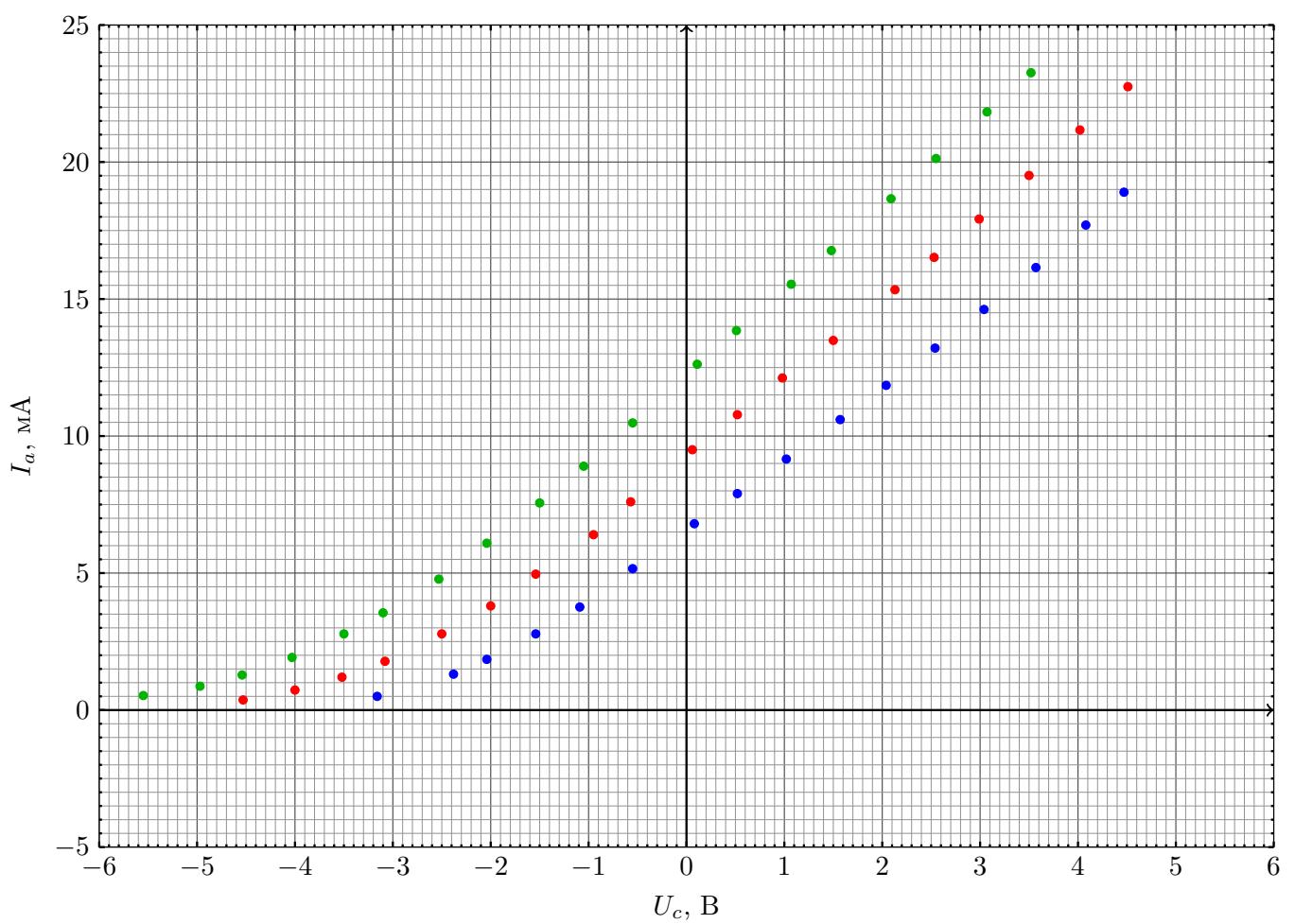


Рис. 4. Снятие анодно-сеточной характеристики

Н

Таблица 6. Зависимость K от частоты ν , при $R_a = 50$ кОм

ν , кГц	$2U_{\text{вых}}$, В
-------------	-----------------------

3. Определение коэффициента усиления усилителя

3.1 Изучение АЧХ усилителя

Подав на вход усилителя сигнал амплитудой $U_{\text{вх}} = 100$ В с генератора ГЗ-112, изменяя частоту, сняли зависимость выходной амплитуды от частоты (АЧХ) и рассчитали коэффициент усиления для каждого значения частоты по формуле (36) (см. прил. 6).

$$K = \frac{2U_{\text{вых}}}{2U_{\text{вх}}} = \frac{2U_{\text{вых}}}{2 \cdot 100 \text{ мВ}} = \frac{2U_{\text{вых}}}{0,2 \text{ В}} \quad (36)$$

Таблица 5. Снятие амплитудно-частотной характеристики усилителя

$\nu_{\text{уст}}$, Гц	Множитель	ν , кГц	$2U_{\text{вых}}$, 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	

3.2 Зависимость усиления от сопротивления нагрузки

Для каждой из характеристик подсчитали коэффициент крутизны S на линейном участке графика.

Таблица 7. Зависимость K от сопротивления нагрузки R_a при частоте $\nu = 1$ кГц

R , кОм	$2U_{\text{вых}}$, В	K
0,5	0,182	0,9
1,0	0,348	1,7
2,0	0,640	3,2
5,0	1,230	6,2
10,0	1,900	9,5
20,0	2,540	12,7
50,0	3,200	16,0
100,0	3,560	17,8
200,0	3,720	18,6
500,0	3,600	18,0
1000,0	3,360	16,8

Таблица 8. Зависимость K от частоты ν ($U_a = 100$ В)

(а) $R = 1$ кОм

(б) $R = 50$ кОм

ν , кГц	$2U_{\text{вых}}$, В	K	ν , кГц	$2U_{\text{вых}}$, В	K
1	0,360	1,80	1	3,240	16,20
20	0,352	1,76	20	3,140	15,70
40	0,356	1,78	40	2,840	14,20
50	0,348	1,74	50	2,640	13,20
70	0,352	1,76	70	2,340	11,70
90	0,352	1,76	90	2,000	10,00
120	0,352	1,76	120	1,680	8,40
140	0,352	1,76	140	1,480	7,40
180	0,344	1,72	180	1,200	6,00
230	0,344	1,72	230	0,984	4,92
270	0,336	1,68	270	0,848	4,24
500	0,308	1,54	500	0,464	2,32
600	0,288	1,44	600	0,388	1,94
700	0,272	1,36	700	0,336	1,68
800	0,254	1,27	800	0,288	1,44
900	0,240	1,20	900	0,260	1,30

Заметим, что при $R = 50$ кОм (см табл. 8б) коэффициент K падает в 2 раза при частоте между $\nu = 120$ кГц и $\nu = 140$ кГц

Построим график зависимости коэффициента усиления от сопротивления нагрузки $K(R_a)$ по табл. 7

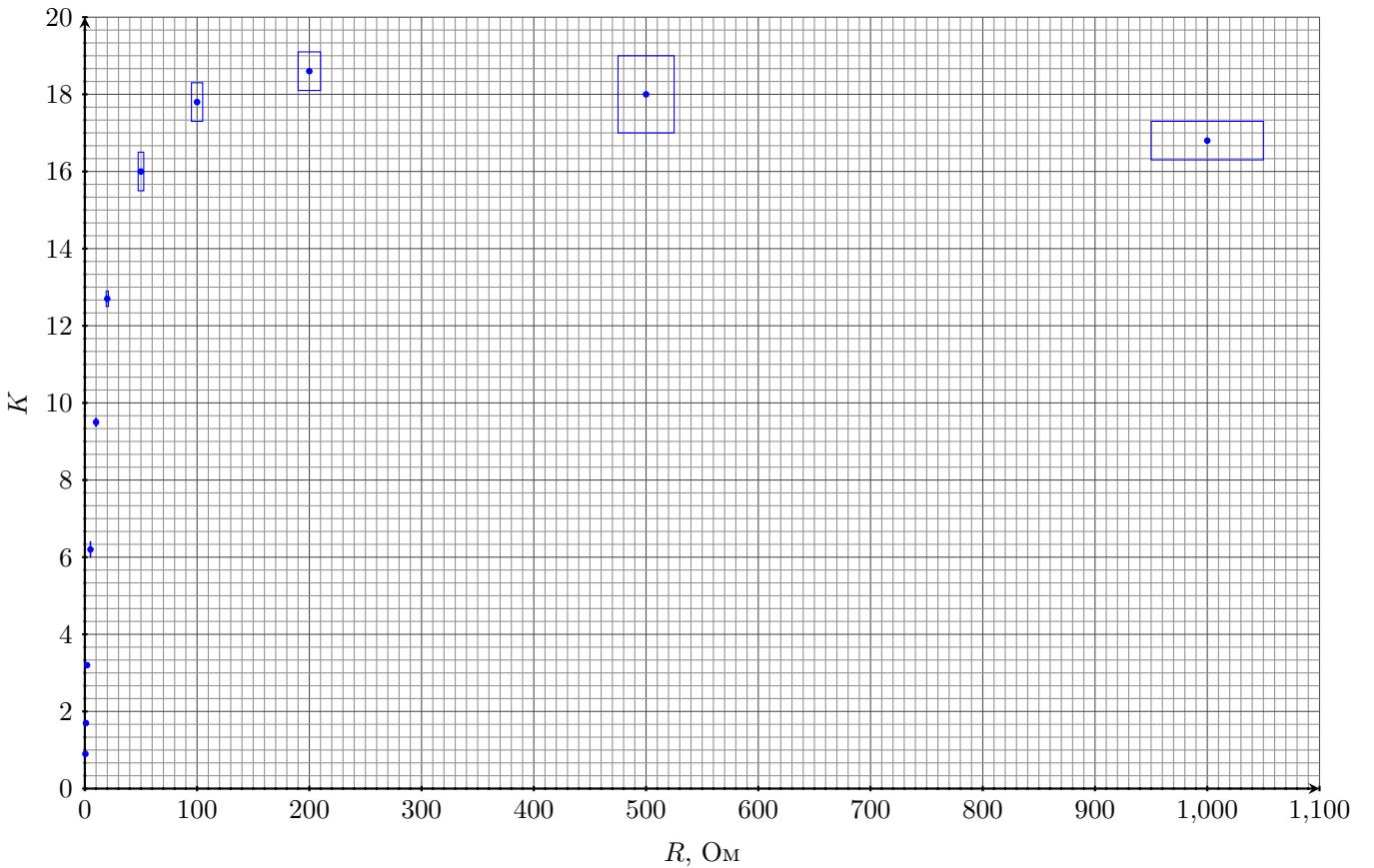


Рис. 5. Зависимость коэффициента усиления K от сопротивления R_a

Погрешности $U_{\text{вых}}$ мы находим из фотографий измерений с помощью осциллографа. Погрешность R возьмём из документации к установке.

Максимальный коэффициент усиления достигается при $R_a = 200$ кОм и равен 18,6, далее рост усиления прекращается и наблюдается спад усиления. Это соответствует тому, что при увеличении R_a рабочая точка на динамической анодно-сеточной характеристике смещается ближе к основанию, где R_i возрастает, а уменьшается

Из формулы (21) следует, что динамический коэффициент не может превзойти статический. Практически динамический коэффициент оказался меньше статического примерно в два раза.

Построим графики зависимости K от частоты сигнала ν по табл. 8а и табл. 8б.

Из графиков видно, что падение коэффициента усиления, по мере увеличения частоты сигнала, происходит быстрее при более высоком сопротивлении.

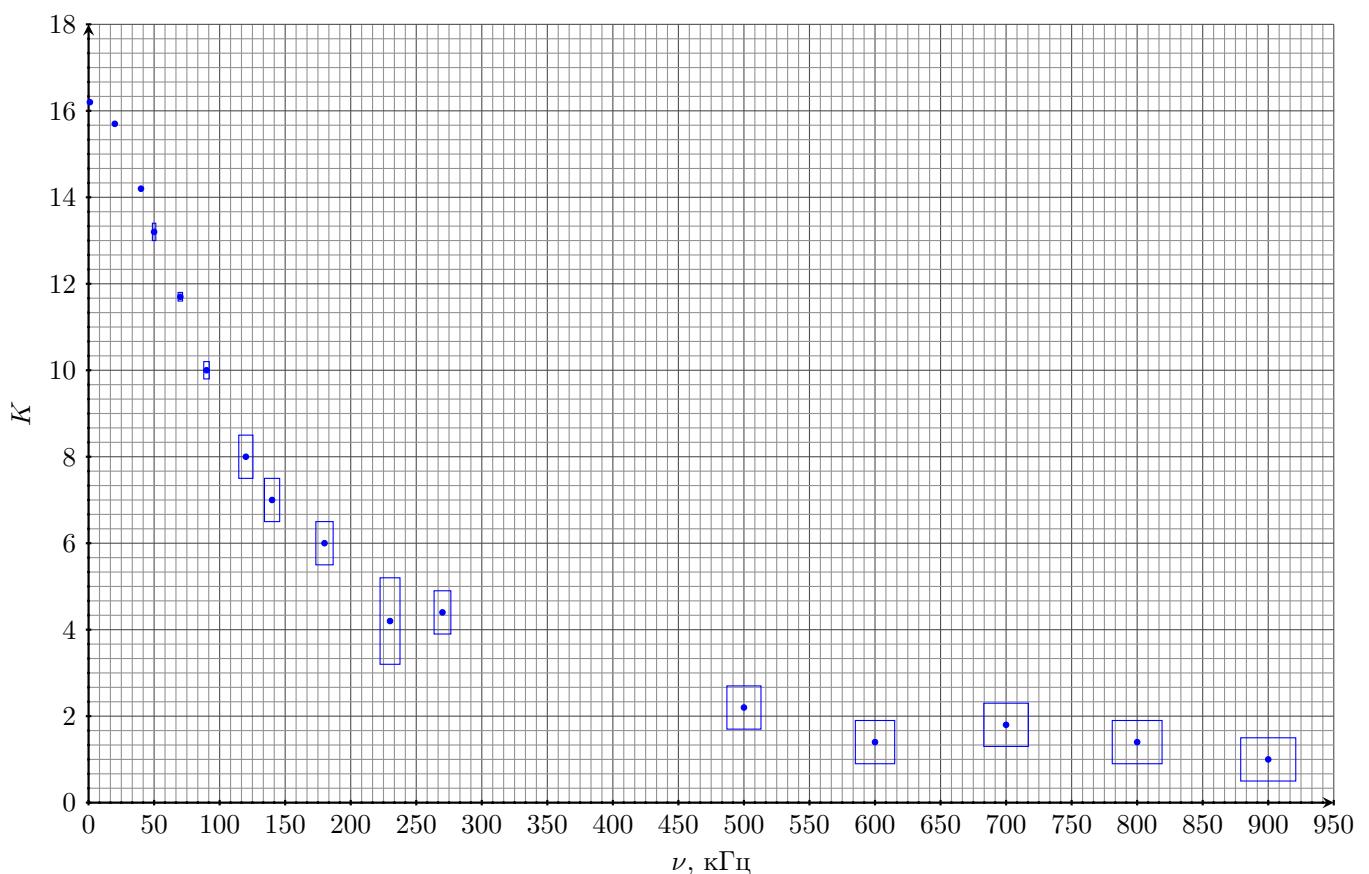


Рис. 6. Зависимость коэффициента усиления от частоты входного сигнала при $R = 50$ кОм

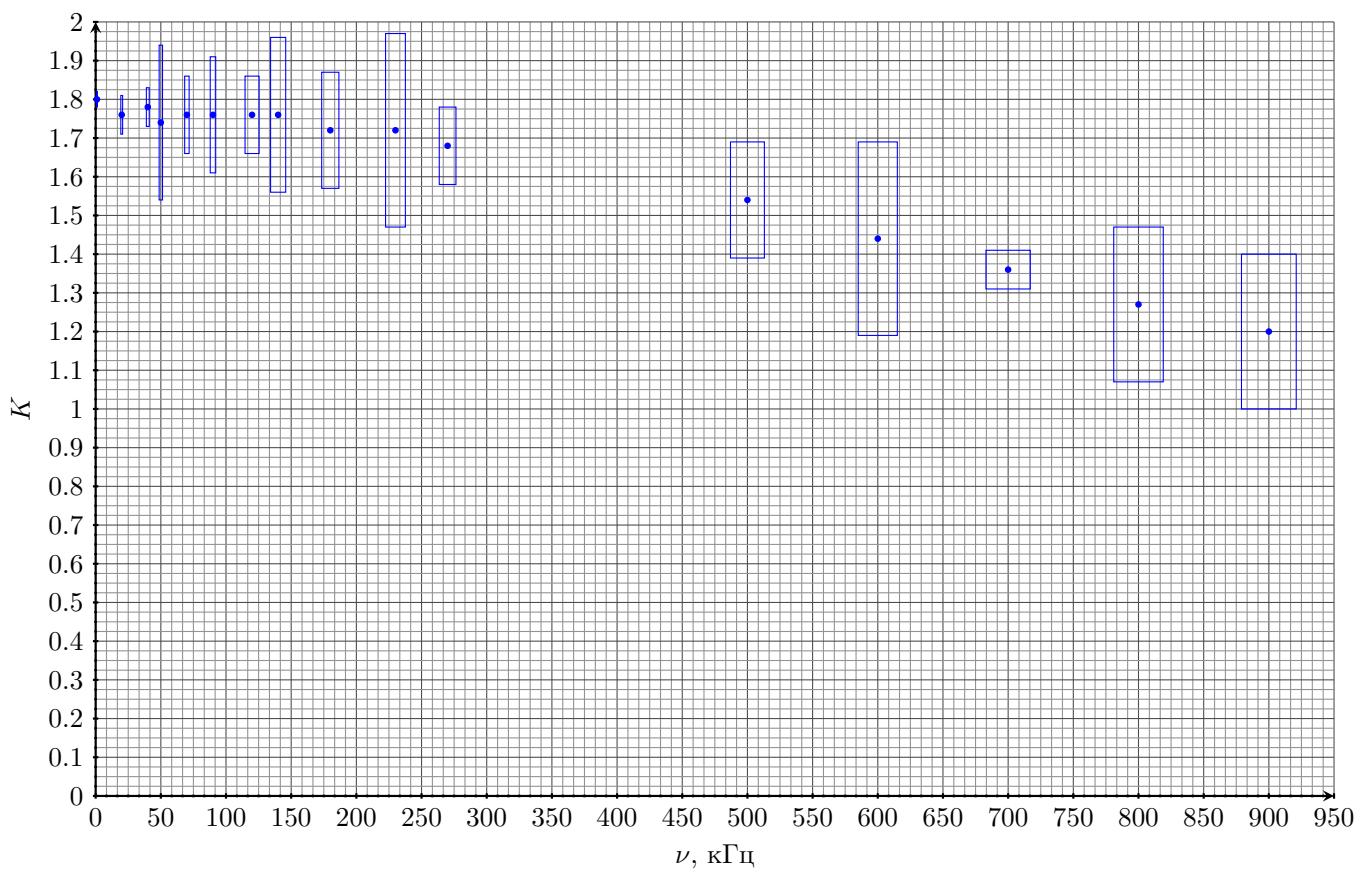


Рис. 7. Зависимость коэффициента усиления от частоты входного сигнала при $R = 1$ кОм

IV. ВЫВОД

Мы изучили принцип работы простейших электронных ламп – диода и триода, нашли их основные характеристики. Вывели закон $3/2$, изучили работу лампы триода в режиме усилителя, сняли его АЧХ, сеточную характеристику. Нашли погрешность наших измерений.

V. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

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

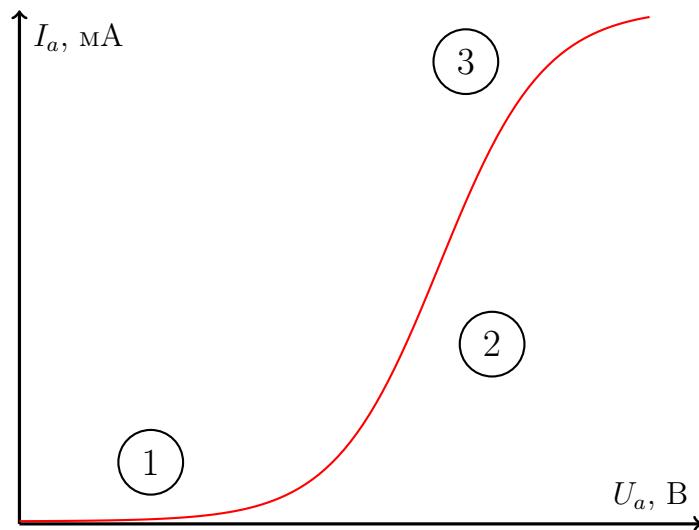


Рис. 8. Качественный график хода анодной характеристики диода

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.

(1) 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.

(2) 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 B — первеанс лампы, зависящий от геометрии электродов.

(3) При дальнейшем увеличении U_a практически все эмитированные катодом электроны достигают анода, и ток выходит на насыщение, ограниченное только эмиссионной способностью катода.

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 пролета 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. Скорость

у поверхности анода найдём из сохранения энергии:

$$\frac{mv^2}{2} = eU_a \rightarrow v = \sqrt{\frac{2eU_a}{m}}$$

Время пролёта t определим из равноускоренного движения:

$$V_{0x} = 0, x_0 = 0 \quad V_x = V, x = d$$

$$V = at, \quad x = \frac{1}{2}at^2 \rightarrow x = V \frac{t}{2} \rightarrow t = \frac{2x}{V}$$

Следовательно:

$$t = \frac{2d}{\sqrt{\frac{2eU_a}{m}}} \rightarrow t = \sqrt{\frac{2m}{eU_a}}d$$

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 подключённой?

Если сетку триода оставить никуда не подключённой (плавающий потенциал), то на неё будет оседать часть электронов, летящих от катода к аноду, и на ней образуется отрицательный потенциал. Это создаёт тормозящее поле для последующих электронов, поэтому анодный ток будет заметно меньше, чем при соединении сетки с катодом (режим диода). По сути, триод с неподключенной 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 замирающим напряжением в сетке.

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

Внутреннее сопротивление триода $R_i = 1/S$ — это динамическая характеристика, а сопротивление постоянному току $R_{\text{пост}}$ — аналитическая. Внутреннее сопротивление триода — величина, характеризующая, как при малом изменении анодного напряжения изменяется анодный ток при неизменном напряжении на сетке. Поскольку анодные ВАХ триода не линейны, то в каждой точке значения R_i различны.

6. Чем определяются частотные свойства триода?

Частотные свойства триода определяются его межэлектродными ёмкостями. Ухудшение усиливающих свойств триода при высоких частотах передаваемого сигнала обусловлено изменением ёмкостного сопротивления. Ток в цепи вместо того, чтобы идти по участку с анодным сопротивлением, начинает шунтироваться через триод, в результате чего мощность, выделяемая на аноде и амплитуда снимаемого сигнала уменьшается.

VI. ПРИЛОЖЕНИЕ

Приложение 1. Вычисление величины крутизны S

$$S_1 = \frac{I_{a_2} - I_{a_1}}{U_{a_2} - U_{a_1}} = \frac{10,16 \text{ mA} - 3,78 \text{ mA}}{4 \text{ B} - 2 \text{ B}} = 3,19 \frac{\text{mA}}{\text{B}}$$

$$S_2 = \frac{I_{a_3} - I_{a_2}}{U_{a_3} - U_{a_2}} = \frac{16,88 \text{ mA} - 10,16 \text{ mA}}{6 \text{ B} - 4 \text{ B}} = 3,36 \frac{\text{mA}}{\text{B}}$$

$$S_3 = \frac{I_{a_4} - I_{a_3}}{U_{a_4} - U_{a_3}} = \frac{24,84 \text{ mA} - 16,88 \text{ mA}}{8 \text{ B} - 6 \text{ B}} = 3,98 \frac{\text{mA}}{\text{B}}$$

$$S_4 = \frac{I_{a_5} - I_{a_4}}{U_{a_5} - U_{a_4}} = \frac{32,4 \text{ mA} - 24,84 \text{ mA}}{10 \text{ B} - 8 \text{ B}} = 3,78 \frac{\text{mA}}{\text{B}}$$

$$S_5 = \frac{I_{a_6} - I_{a_5}}{U_{a_6} - U_{a_5}} = \frac{40,9 \text{ mA} - 32,4 \text{ mA}}{12 \text{ B} - 10 \text{ B}} = 4,25 \frac{\text{mA}}{\text{B}}$$

$$S_6 = \frac{I_{a_7} - I_{a_6}}{U_{a_7} - U_{a_6}} = \frac{49,94 \text{ mA} - 40,9 \text{ mA}}{14 \text{ B} - 12 \text{ B}} = 4,52 \frac{\text{mA}}{\text{B}}$$

$$S_7 = \frac{I_{a_8} - I_{a_7}}{U_{a_8} - U_{a_7}} = \frac{62,4 \text{ mA} - 49,94 \text{ mA}}{16 \text{ B} - 14 \text{ B}} = 6,23 \frac{\text{mA}}{\text{B}}$$

$$S_8 = \frac{I_{a_9} - I_{a_8}}{U_{a_9} - U_{a_8}} = \frac{73,52 \text{ mA} - 62,4 \text{ mA}}{18 \text{ B} - 16 \text{ B}} = 5,56 \frac{\text{mA}}{\text{B}}$$

$$S_9 = \frac{I_{a_{10}} - I_{a_9}}{U_{a_{10}} - U_{a_9}} = \frac{86,31 \text{ mA} - 73,52 \text{ mA}}{20 \text{ B} - 18 \text{ B}} = 6,40 \frac{\text{mA}}{\text{B}}$$

Приложение 2. Вычисление погрешности постоянного тока I_a

$$\Delta I_{\text{пп}_1} = 0,002I_{a_1} + 0,02 = 0,002 \times 3,78 \text{ mA} + 0,02 = 0,03 \text{ mA}$$

$$\Delta I_{\text{пп}_2} = 0,002I_{a_2} + 0,02 = 0,002 \times 10,16 \text{ mA} + 0,02 = 0,04 \text{ mA}$$

$$\Delta I_{\text{пп}_3} = 0,002I_{a_3} + 0,02 = 0,002 \times 16,88 \text{ mA} + 0,02 = 0,05 \text{ mA}$$

$$\Delta I_{\text{пп}_4} = 0,002I_{a_4} + 0,02 = 0,002 \times 24,84 \text{ mA} + 0,02 = 0,07 \text{ mA}$$

$$\Delta I_{\text{пп}_5} = 0,002I_{a_5} + 0,02 = 0,002 \times 32,4 \text{ mA} + 0,02 = 0,08 \text{ mA}$$

$$\Delta I_{\text{пп}_6} = 0,002I_{a_6} + 0,02 = 0,002 \times 40,9 \text{ mA} + 0,02 = 0,10 \text{ mA}$$

$$\Delta I_{\text{пп}_7} = 0,002I_{a_7} + 0,02 = 0,002 \times 49,94 \text{ mA} + 0,02 = 0,12 \text{ mA}$$

$$\Delta I_{\text{пп}_8} = 0,002I_{a_8} + 0,02 = 0,002 \times 62,4 \text{ mA} + 0,02 = 0,14 \text{ mA}$$

$$\Delta I_{\text{пп}_9} = 0,002I_{a_9} + 0,02 = 0,002 \times 73,52 \text{ mA} + 0,02 = 0,17 \text{ mA}$$

$$\Delta I_{\text{пп}_{10}} = 0,002I_{a_{10}} + 0,02 = 0,002 \times 86,31 \text{ mA} + 0,02 = 0,19 \text{ mA}$$

Приложение 3. Вычисление погрешности напряжения U_a

$$\Delta U_{\text{пп}_1} = 0,005U_{a_1} + 0,299 = 0,005 \times 2 \text{ B} + 0,299 = 0,31 \text{ B}$$

$$\Delta U_{\text{пп}_2} = 0,005U_{a_2} + 0,299 = 0,005 \times 4 \text{ B} + 0,299 = 0,32 \text{ B}$$

$$\Delta U_{\text{пп}_3} = 0,005U_{a_3} + 0,299 = 0,005 \times 6 \text{ B} + 0,299 = 0,33 \text{ B}$$

$$\Delta U_{\text{пп}_4} = 0,005U_{a_4} + 0,299 = 0,005 \times 8 \text{ B} + 0,299 = 0,34 \text{ B}$$

$$\Delta U_{\text{пп}_5} = 0,005U_{a_5} + 0,299 = 0,005 \times 10 \text{ B} + 0,299 = 0,35 \text{ B}$$

$$\Delta U_{\text{пп}_6} = 0,005U_{a_6} + 0,299 = 0,005 \times 12 \text{ B} + 0,299 = 0,36 \text{ B}$$

$$\Delta U_{\text{пп}_7} = 0,005U_{a_7} + 0,299 = 0,005 \times 14 \text{ B} + 0,299 = 0,37 \text{ B}$$

$$\Delta U_{\text{пп}_8} = 0,005U_{a_8} + 0,299 = 0,005 \times 16 \text{ B} + 0,299 = 0,38 \text{ B}$$

$$\Delta U_{\text{пп}_9} = 0,005U_{a_9} + 0,299 = 0,005 \times 18 \text{ B} + 0,299 = 0,39 \text{ B}$$

$$\Delta U_{\text{пп}_{10}} = 0,005U_{a_{10}} + 0,299 = 0,005 \times 20 \text{ B} + 0,299 = 0,40 \text{ B}$$

Приложение 4. Вычисление консвенной погрешности S

$$\begin{aligned} \Delta S_1 &= \frac{\sqrt{(I_{a_2} - I_{a_1})^2 (\Delta U_{a_1}^2 + \Delta U_{a_2}^2) + (U_{a_2} - U_{a_1})^2 (\Delta I_{a_1}^2 + \Delta I_{a_2}^2)}}{(U_{a_2} - U_{a_1})^2} = \\ &= \frac{\sqrt{(0,03 \text{ mA}^2 + 0,04 \text{ mA}^2)(4,0 \text{ B} - 2,0 \text{ B})^2 + (0,31 \text{ B}^2 + 0,32 \text{ B}^2)(10,16 \text{ mA} - 3,78 \text{ mA})^2}}{(4,0 \text{ B} - 2,0 \text{ B})^2} = 0,71 \frac{\text{mA}}{\text{B}} \end{aligned}$$

$$\Delta S_2 = \frac{\sqrt{(I_{a_3}-I_{a_2})^2(\Delta U_{a_2}^2+\Delta U_{a_3}^2)+(U_{a_3}-U_{a_2})^2(\Delta I_{a_2}^2+\Delta I_{a_3}^2)}}{(U_{a_3}-U_{a_2})^2} = \frac{\sqrt{(0,04\text{mA}^2+0,05\text{mA}^2)(6,0\text{B}-4,0\text{B})^2+(0,32\text{B}^2+0,33\text{B}^2)(16,88\text{mA}-10,16\text{mA})^2}}{(6,0\text{B}-4,0\text{B})^2} = 0,77 \frac{\text{mA}}{\text{B}}$$

$$\Delta S_3 = \frac{\sqrt{(I_{a_4}-I_{a_3})^2(\Delta U_{a_3}^2+\Delta U_{a_4}^2)+(U_{a_4}-U_{a_3})^2(\Delta I_{a_3}^2+\Delta I_{a_4}^2)}}{(U_{a_4}-U_{a_3})^2} = \frac{\sqrt{(0,05\text{mA}^2+0,07\text{mA}^2)(8,0\text{B}-6,0\text{B})^2+(0,33\text{B}^2+0,34\text{B}^2)(24,84\text{mA}-16,88\text{mA})^2}}{(8,0\text{B}-6,0\text{B})^2} = 0,94 \frac{\text{mA}}{\text{B}}$$

$$\Delta S_4 = \frac{\sqrt{(I_{a_5}-I_{a_4})^2(\Delta U_{a_4}^2+\Delta U_{a_5}^2)+(U_{a_5}-U_{a_4})^2(\Delta I_{a_4}^2+\Delta I_{a_5}^2)}}{(U_{a_5}-U_{a_4})^2} = \frac{\sqrt{(0,07\text{mA}^2+0,08\text{mA}^2)(10,0\text{B}-8,0\text{B})^2+(0,34\text{B}^2+0,35\text{B}^2)(32,4\text{mA}-24,84\text{mA})^2}}{(10,0\text{B}-8,0\text{B})^2} = 0,92 \frac{\text{mA}}{\text{B}}$$

$$\Delta S_5 = \frac{\sqrt{(I_{a_6}-I_{a_5})^2(\Delta U_{a_5}^2+\Delta U_{a_6}^2)+(U_{a_6}-U_{a_5})^2(\Delta I_{a_5}^2+\Delta I_{a_6}^2)}}{(U_{a_6}-U_{a_5})^2} = \frac{\sqrt{(0,08\text{mA}^2+0,1\text{mA}^2)(12,0\text{B}-10,0\text{B})^2+(0,35\text{B}^2+0,36\text{B}^2)(40,9\text{mA}-32,4\text{mA})^2}}{(12,0\text{B}-10,0\text{B})^2} = 1,07 \frac{\text{mA}}{\text{B}}$$

$$\Delta S_6 = \frac{\sqrt{(I_{a_7}-I_{a_6})^2(\Delta U_{a_6}^2+\Delta U_{a_7}^2)+(U_{a_7}-U_{a_6})^2(\Delta I_{a_6}^2+\Delta I_{a_7}^2)}}{(U_{a_7}-U_{a_6})^2} = \frac{\sqrt{(0,1\text{mA}^2+0,12\text{mA}^2)(14,0\text{B}-12,0\text{B})^2+(0,36\text{B}^2+0,37\text{B}^2)(49,94\text{mA}-40,9\text{mA})^2}}{(14,0\text{B}-12,0\text{B})^2} = 1,17 \frac{\text{mA}}{\text{B}}$$

$$\Delta S_7 = \frac{\sqrt{(I_{a_8}-I_{a_7})^2(\Delta U_{a_7}^2+\Delta U_{a_8}^2)+(U_{a_8}-U_{a_7})^2(\Delta I_{a_7}^2+\Delta I_{a_8}^2)}}{(U_{a_8}-U_{a_7})^2} = \frac{\sqrt{(0,12\text{mA}^2+0,14\text{mA}^2)(16,0\text{B}-14,0\text{B})^2+(0,37\text{B}^2+0,38\text{B}^2)(62,4\text{mA}-49,94\text{mA})^2}}{(16,0\text{B}-14,0\text{B})^2} = 1,65 \frac{\text{mA}}{\text{B}}$$

$$\Delta S_8 = \frac{\sqrt{(I_{a_9}-I_{a_8})^2(\Delta U_{a_8}^2+\Delta U_{a_9}^2)+(U_{a_9}-U_{a_8})^2(\Delta I_{a_8}^2+\Delta I_{a_9}^2)}}{(U_{a_9}-U_{a_8})^2} = \frac{\sqrt{(0,14\text{mA}^2+0,17\text{mA}^2)(18,0\text{B}-16,0\text{B})^2+(0,38\text{B}^2+0,39\text{B}^2)(73,52\text{mA}-62,4\text{mA})^2}}{(18,0\text{B}-16,0\text{B})^2} = 1,52 \frac{\text{mA}}{\text{B}}$$

$$\Delta S_9 = \frac{\sqrt{(I_{a_{10}}-I_{a_9})^2(\Delta U_{a_{10}}^2+\Delta U_{a_9}^2)+(U_{a_{10}}-U_{a_9})^2(\Delta I_{a_{10}}^2+\Delta I_{a_9}^2)}}{(U_{a_{10}}-U_{a_9})^2} = \frac{\sqrt{(0,17\text{mA}^2+0,19\text{mA}^2)(20,0\text{B}-18,0\text{B})^2+(0,39\text{B}^2+0,4\text{B}^2)(86,31\text{mA}-73,52\text{mA})^2}}{(20,0\text{B}-18,0\text{B})^2} = 1,79 \frac{\text{mA}}{\text{B}}$$

Приложение 5. Вычисление параметра B

$$B = \frac{I_{a_1} U_{a_1}^{1,5} + \dots + I_{a_{10}} U_{a_{10}}^{1,5}}{U_{a_1}^3 + \dots + U_{a_{10}}^3} = \frac{10,2 \text{ mA} \cdot (4 \text{ B})^{1,5} + 16,9 \text{ mA} \cdot (6 \text{ B})^{1,5} + 24,8 \text{ mA} \cdot (8 \text{ B})^{1,5} + 3,8 \text{ mA} \cdot (2 \text{ B})^{1,5} + 32,4 \text{ mA} \cdot (10 \text{ B})^{1,5} + 40,9 \text{ mA} \cdot (12 \text{ B})^{1,5} + 49,9 \text{ mA} \cdot (14 \text{ B})^{1,5} + 62,4 \text{ mA} \cdot (16 \text{ B})^{1,5} + 73,5 \text{ mA} \cdot (18 \text{ B})^{1,5} + 86,3 \text{ mA} \cdot (20 \text{ B})^{1,5}}{(10 \text{ B})^3 + (12 \text{ B})^3 + (14 \text{ B})^3 + (16 \text{ B})^3 + (18 \text{ B})^3 + (20 \text{ B})^3 + (2 \text{ B})^3 + (4 \text{ B})^3 + (6 \text{ B})^3 + (8 \text{ B})^3} = 0,97 \frac{\text{mA}}{\text{B}^{3/2}}$$

Приложение 6. Вычисление коэффициента усиления K

$$\begin{array}{lll} K_1 = \frac{2U_{\text{вых}_0}}{2U_{\text{вх}}} = \frac{0,36\text{B}}{0,2\text{B}} = 1,80 & K_7 = \frac{2U_{\text{вых}_6}}{2U_{\text{вх}}} = \frac{0,352\text{B}}{0,2\text{B}} = 1,76 & K_{13} = \frac{2U_{\text{вых}_{12}}}{2U_{\text{вх}}} = \frac{0,288\text{B}}{0,2\text{B}} = 1,44 \\ K_2 = \frac{2U_{\text{вых}_1}}{2U_{\text{вх}}} = \frac{0,352\text{B}}{0,2\text{B}} = 1,76 & K_8 = \frac{2U_{\text{вых}_7}}{2U_{\text{вх}}} = \frac{0,352\text{B}}{0,2\text{B}} = 1,76 & K_{14} = \frac{2U_{\text{вых}_{13}}}{2U_{\text{вх}}} = \frac{0,272\text{B}}{0,2\text{B}} = 1,36 \\ K_3 = \frac{2U_{\text{вых}_2}}{2U_{\text{вх}}} = \frac{0,356\text{B}}{0,2\text{B}} = 1,78 & K_9 = \frac{2U_{\text{вых}_8}}{2U_{\text{вх}}} = \frac{0,344\text{B}}{0,2\text{B}} = 1,72 & K_{15} = \frac{2U_{\text{вых}_{14}}}{2U_{\text{вх}}} = \frac{0,254\text{B}}{0,2\text{B}} = 1,27 \\ K_4 = \frac{2U_{\text{вых}_3}}{2U_{\text{вх}}} = \frac{0,348\text{B}}{0,2\text{B}} = 1,74 & K_{10} = \frac{2U_{\text{вых}_9}}{2U_{\text{вх}}} = \frac{0,344\text{B}}{0,2\text{B}} = 1,72 & K_{16} = \frac{2U_{\text{вых}_{15}}}{2U_{\text{вх}}} = \frac{0,24\text{B}}{0,2\text{B}} = 1,20 \\ K_5 = \frac{2U_{\text{вых}_4}}{2U_{\text{вх}}} = \frac{0,352\text{B}}{0,2\text{B}} = 1,76 & K_{11} = \frac{2U_{\text{вых}_{10}}}{2U_{\text{вх}}} = \frac{0,336\text{B}}{0,2\text{B}} = 1,68 & \\ K_6 = \frac{2U_{\text{вых}_5}}{2U_{\text{вх}}} = \frac{0,352\text{B}}{0,2\text{B}} = 1,76 & K_{12} = \frac{2U_{\text{вых}_{11}}}{2U_{\text{вх}}} = \frac{0,308\text{B}}{0,2\text{B}} = 1,54 & \end{array}$$

Приложение 7. Вычисление приборной погрешности сигнала

$$\Delta\nu_1 = k_{\text{пп} 1} \left(\frac{\nu_{\text{вкт} 1}}{50} + \frac{3}{10} \right) = \\ = 10^2 \left(\frac{10\Gamma_{\text{п}}}{50} + \frac{3}{10} \right) = 0,1 \text{ кГц}$$

$$\Delta\nu_2 = k_{\text{пп} 2} \left(\frac{\nu_{\text{вкт} 2}}{50} + \frac{3}{10} \right) = \\ = 10^3 \left(\frac{20\Gamma_{\text{п}}}{50} + \frac{3}{10} \right) = 0,7 \text{ кГц}$$

$$\Delta\nu_3 = k_{\text{пп} 3} \left(\frac{\nu_{\text{вкт} 3}}{50} + \frac{3}{10} \right) = \\ = 10^3 \left(\frac{40\Gamma_{\text{п}}}{50} + \frac{3}{10} \right) = 1,1 \text{ кГц}$$

$$\Delta\nu_4 = k_{\text{пп} 4} \left(\frac{\nu_{\text{вкт} 4}}{50} + \frac{3}{10} \right) = \\ = 10^3 \left(\frac{50\Gamma_{\text{п}}}{50} + \frac{3}{10} \right) = 1,3 \text{ кГц}$$

$$\Delta\nu_5 = k_{\text{пп} 5} \left(\frac{\nu_{\text{вкт} 5}}{50} + \frac{3}{10} \right) = \\ = 10^3 \left(\frac{70\Gamma_{\text{п}}}{50} + \frac{3}{10} \right) = 1,7 \text{ кГц}$$

$$\Delta\nu_6 = k_{\text{пп} 6} \left(\frac{\nu_{\text{вкт} 6}}{50} + \frac{3}{10} \right) = \\ = 10^3 \left(\frac{90\Gamma_{\text{п}}}{50} + \frac{3}{10} \right) = 2,1 \text{ кГц}$$

$$\Delta\nu_7 = k_{\text{пп} 7} \left(\frac{\nu_{\text{вкт} 7}}{50} + \frac{3}{10} \right) = \\ = 10^4 \left(\frac{12\Gamma_{\text{п}}}{50} + \frac{3}{10} \right) = 5,4 \text{ кГц}$$

$$\Delta\nu_8 = k_{\text{пп} 8} \left(\frac{\nu_{\text{вкт} 8}}{50} + \frac{3}{10} \right) = \\ = 10^4 \left(\frac{14\Gamma_{\text{п}}}{50} + \frac{3}{10} \right) = 5,8 \text{ кГц}$$

$$\Delta\nu_9 = k_{\text{пп} 9} \left(\frac{\nu_{\text{вкт} 9}}{50} + \frac{3}{10} \right) = \\ = 10^4 \left(\frac{18\Gamma_{\text{п}}}{50} + \frac{3}{10} \right) = 6,6 \text{ кГц}$$

$$\Delta\nu_{10} = k_{\text{пп} 10} \left(\frac{\nu_{\text{вкт} 10}}{50} + \frac{3}{10} \right) = \\ = 10^4 \left(\frac{23\Gamma_{\text{п}}}{50} + \frac{3}{10} \right) = 7,6 \text{ кГц}$$

$$\Delta\nu_{11} = k_{\text{пп} 11} \left(\frac{\nu_{\text{вкт} 11}}{50} + \frac{3}{10} \right) = \\ = 10^4 \left(\frac{27\Gamma_{\text{п}}}{50} + \frac{3}{10} \right) = 8,4 \text{ кГц}$$

$$\Delta\nu_{12} = k_{\text{пп} 12} \left(\frac{\nu_{\text{вкт} 12}}{50} + \frac{3}{10} \right) = \\ = 10^4 \left(\frac{50\Gamma_{\text{п}}}{50} + \frac{3}{10} \right) = 13,0 \text{ кГц}$$

$$\Delta\nu_{13} = k_{\text{пп} 13} \left(\frac{\nu_{\text{вкт} 13}}{50} + \frac{3}{10} \right) = \\ = 10^4 \left(\frac{60\Gamma_{\text{п}}}{50} + \frac{3}{10} \right) = 15,0 \text{ кГц}$$

$$\Delta\nu_{14} = k_{\text{пп} 14} \left(\frac{\nu_{\text{вкт} 14}}{50} + \frac{3}{10} \right) = \\ = 10^4 \left(\frac{70\Gamma_{\text{п}}}{50} + \frac{3}{10} \right) = 17,0 \text{ кГц}$$

$$\Delta\nu_{15} = k_{\text{пп} 15} \left(\frac{\nu_{\text{вкт} 15}}{50} + \frac{3}{10} \right) = \\ = 10^4 \left(\frac{80\Gamma_{\text{п}}}{50} + \frac{3}{10} \right) = 19,0 \text{ кГц}$$

$$\Delta\nu_{16} = k_{\text{пп} 16} \left(\frac{\nu_{\text{вкт} 16}}{50} + \frac{3}{10} \right) = \\ = 10^4 \left(\frac{90\Gamma_{\text{п}}}{50} + \frac{3}{10} \right) = 21,0 \text{ кГц}$$

Приложение 8. Вычисление погрешности анодного напряжения при измерении анодной характеристики триода

$$\begin{aligned} \Delta U_{a_1} &= 0,005U_{a_1} + 0,299 = 0,005 \times 10 \text{ В} + 0,299 = 0,3 \text{ В} & \Delta U_{a_{10}} &= 0,005U_{a_{10}} + 0,299 = 0,005 \times 100 \text{ В} + 0,299 = 0,8 \text{ В} \\ \Delta U_{a_2} &= 0,005U_{a_2} + 0,299 = 0,005 \times 20 \text{ В} + 0,299 = 0,4 \text{ В} & \Delta U_{a_{11}} &= 0,005U_{a_{11}} + 0,299 = 0,005 \times 110 \text{ В} + 0,299 = 0,8 \text{ В} \\ \Delta U_{a_3} &= 0,005U_{a_3} + 0,299 = 0,005 \times 30 \text{ В} + 0,299 = 0,4 \text{ В} & \Delta U_{a_{12}} &= 0,005U_{a_{12}} + 0,299 = 0,005 \times 120 \text{ В} + 0,299 = 0,9 \text{ В} \\ \Delta U_{a_4} &= 0,005U_{a_4} + 0,299 = 0,005 \times 40 \text{ В} + 0,299 = 0,5 \text{ В} & \Delta U_{a_{13}} &= 0,005U_{a_{13}} + 0,299 = 0,005 \times 130 \text{ В} + 0,299 = 0,9 \text{ В} \\ \Delta U_{a_5} &= 0,005U_{a_5} + 0,299 = 0,005 \times 50 \text{ В} + 0,299 = 0,5 \text{ В} & \Delta U_{a_{14}} &= 0,005U_{a_{14}} + 0,299 = 0,005 \times 140 \text{ В} + 0,299 = 1,0 \text{ В} \\ \Delta U_{a_6} &= 0,005U_{a_6} + 0,299 = 0,005 \times 60 \text{ В} + 0,299 = 0,6 \text{ В} & \Delta U_{a_{15}} &= 0,005U_{a_{15}} + 0,299 = 0,005 \times 150 \text{ В} + 0,299 = 1,0 \text{ В} \\ \Delta U_{a_7} &= 0,005U_{a_7} + 0,299 = 0,005 \times 70 \text{ В} + 0,299 = 0,6 \text{ В} & \Delta U_{a_{16}} &= 0,005U_{a_{16}} + 0,299 = 0,005 \times 160 \text{ В} + 0,299 = 1,1 \text{ В} \\ \Delta U_{a_8} &= 0,005U_{a_8} + 0,299 = 0,005 \times 80 \text{ В} + 0,299 = 0,7 \text{ В} & \Delta U_{a_{17}} &= 0,005U_{a_{17}} + 0,299 = 0,005 \times 170 \text{ В} + 0,299 = 1,1 \text{ В} \\ \Delta U_{a_9} &= 0,005U_{a_9} + 0,299 = 0,005 \times 90 \text{ В} + 0,299 = 0,7 \text{ В} & \Delta U_{a_{18}} &= 0,005U_{a_{18}} + 0,299 = 0,005 \times 180 \text{ В} + 0,299 = 1,2 \text{ В} \end{aligned}$$

Приложение 9. Вычисление погрешности анодного тока при измерении анодной характеристики триода

$$\begin{aligned} \Delta I_a^{-4B} &= 0,002I_a^{-4B} + 0,02 = 0,002 \times 0,12 \text{ мА} + 0,02 = 0,02 \text{ мА} & \Delta I_a^{-4B} &= 0,002I_a^{-4B} + 0,02 = 0,002 \times 4,75 \text{ мА} + 0,02 = 0,03 \text{ мА} \\ \Delta I_a^{-4B} &= 0,002I_a^{-4B} + 0,02 = 0,002 \times 0,34 \text{ мА} + 0,02 = 0,02 \text{ мА} & \Delta I_a^{-4B} &= 0,002I_a^{-4B} + 0,02 = 0,002 \times 5,93 \text{ мА} + 0,02 = 0,03 \text{ мА} \\ \Delta I_a^{-4B} &= 0,002I_a^{-4B} + 0,02 = 0,002 \times 0,72 \text{ мА} + 0,02 = 0,02 \text{ мА} & \Delta I_a^{-4B} &= 0,002I_a^{-4B} + 0,02 = 0,002 \times 7,15 \text{ мА} + 0,02 = 0,03 \text{ мА} \\ \Delta I_a^{-4B} &= 0,002I_a^{-4B} + 0,02 = 0,002 \times 1,26 \text{ мА} + 0,02 = 0,02 \text{ мА} & \Delta I_a^{-4B} &= 0,002I_a^{-4B} + 0,02 = 0,002 \times 8,44 \text{ мА} + 0,02 = 0,04 \text{ мА} \\ \Delta I_a^{-4B} &= 0,002I_a^{-4B} + 0,02 = 0,002 \times 1,95 \text{ мА} + 0,02 = 0,02 \text{ мА} & \Delta I_a^{-4B} &= 0,002I_a^{-4B} + 0,02 = 0,002 \times 9,84 \text{ мА} + 0,02 = 0,04 \text{ мА} \\ \Delta I_a^{-4B} &= 0,002I_a^{-4B} + 0,02 = 0,002 \times 2,77 \text{ мА} + 0,02 = 0,03 \text{ мА} & \Delta I_a^{-4B} &= 0,002I_a^{-4B} + 0,02 = 0,002 \times 11,27 \text{ мА} + 0,02 = 0,04 \text{ мА} \\ \Delta I_a^{-4B} &= 0,002I_a^{-4B} + 0,02 = 0,002 \times 3,72 \text{ мА} + 0,02 = 0,03 \text{ мА} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta I_a^{-2B} &= 0,002I_a^{-2B} + 0,02 = 0,002 \times 0,16 \text{ мА} + 0,02 = 0,02 \text{ мА} & \Delta I_a^{-2B} &= 0,002I_a^{-2B} + 0,02 = 0,002 \times 4,92 \text{ мА} + 0,02 = 0,03 \text{ мА} \\ \Delta I_a^{-2B} &= 0,002I_a^{-2B} + 0,02 = 0,002 \times 0,54 \text{ мА} + 0,02 = 0,02 \text{ мА} & \Delta I_a^{-2B} &= 0,002I_a^{-2B} + 0,02 = 0,002 \times 6,18 \text{ мА} + 0,02 = 0,03 \text{ мА} \\ \Delta I_a^{-2B} &= 0,002I_a^{-2B} + 0,02 = 0,002 \times 1,13 \text{ мА} + 0,02 = 0,02 \text{ мА} & \Delta I_a^{-2B} &= 0,002I_a^{-2B} + 0,02 = 0,002 \times 7,46 \text{ мА} + 0,02 = 0,03 \text{ мА} \\ \Delta I_a^{-2B} &= 0,002I_a^{-2B} + 0,02 = 0,002 \times 1,90 \text{ мА} + 0,02 = 0,02 \text{ мА} & \Delta I_a^{-2B} &= 0,002I_a^{-2B} + 0,02 = 0,002 \times 8,77 \text{ мА} + 0,02 = 0,04 \text{ мА} \\ \Delta I_a^{-2B} &= 0,002I_a^{-2B} + 0,02 = 0,002 \times 2,81 \text{ мА} + 0,02 = 0,03 \text{ мА} & \Delta I_a^{-2B} &= 0,002I_a^{-2B} + 0,02 = 0,002 \times 10,16 \text{ мА} + 0,02 = 0,04 \text{ мА} \\ \Delta I_a^{-2B} &= 0,002I_a^{-2B} + 0,02 = 0,002 \times 3,82 \text{ мА} + 0,02 = 0,03 \text{ мА} & \Delta I_a^{-2B} &= 0,002I_a^{-2B} + 0,02 = 0,002 \times 11,65 \text{ мА} + 0,02 = 0,04 \text{ мА} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Delta I_{a1}^{0B} &= 0,002I_{a1}^{0B} + 0,02 = 0,002 \times 1,39 \text{ mA} + 0,02 = 0,02 \text{ mA} & \Delta I_{a8}^{0B} &= 0,002I_{a8}^{0B} + 0,02 = 0,002 \times 9,72 \text{ mA} + 0,02 = 0,04 \text{ mA} \\
\Delta I_{a2}^{0B} &= 0,002I_{a2}^{0B} + 0,02 = 0,002 \times 2,35 \text{ mA} + 0,02 = 0,02 \text{ mA} & \Delta I_{a9}^{0B} &= 0,002I_{a9}^{0B} + 0,02 = 0,002 \times 11,19 \text{ mA} + 0,02 = 0,04 \text{ mA} \\
\Delta I_{a3}^{0B} &= 0,002I_{a3}^{0B} + 0,02 = 0,002 \times 3,39 \text{ mA} + 0,02 = 0,03 \text{ mA} & \Delta I_{a10}^{0B} &= 0,002I_{a10}^{0B} + 0,02 = 0,002 \times 12,73 \text{ mA} + 0,02 = 0,05 \text{ mA} \\
\Delta I_{a4}^{0B} &= 0,002I_{a4}^{0B} + 0,02 = 0,002 \times 4,50 \text{ mA} + 0,02 = 0,03 \text{ mA} & \Delta I_{a11}^{0B} &= 0,002I_{a11}^{0B} + 0,02 = 0,002 \times 14,32 \text{ mA} + 0,02 = 0,05 \text{ mA} \\
\Delta I_{a5}^{0B} &= 0,002I_{a5}^{0B} + 0,02 = 0,002 \times 5,77 \text{ mA} + 0,02 = 0,03 \text{ mA} & \Delta I_{a12}^{0B} &= 0,002I_{a12}^{0B} + 0,02 = 0,002 \times 15,45 \text{ mA} + 0,02 = 0,05 \text{ mA} \\
\Delta I_{a6}^{0B} &= 0,002I_{a6}^{0B} + 0,02 = 0,002 \times 6,97 \text{ mA} + 0,02 = 0,03 \text{ mA} & \Delta I_{a13}^{0B} &= 0,002I_{a13}^{0B} + 0,02 = 0,002 \times 17,60 \text{ mA} + 0,02 = 0,06 \text{ mA} \\
\Delta I_{a7}^{0B} &= 0,002I_{a7}^{0B} + 0,02 = 0,002 \times 8,33 \text{ mA} + 0,02 = 0,04 \text{ mA}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Delta I_{a1}^{2B} &= 0,002I_{a1}^{2B} + 0,02 = 0,002 \times 4,67 \text{ mA} + 0,02 = 0,03 \text{ mA} & \Delta I_{a7}^{2B} &= 0,002I_{a7}^{2B} + 0,02 = 0,002 \times 13,59 \text{ mA} + 0,02 = 0,05 \text{ mA} \\
\Delta I_{a2}^{2B} &= 0,002I_{a2}^{2B} + 0,02 = 0,002 \times 6,01 \text{ mA} + 0,02 = 0,03 \text{ mA} & \Delta I_{a8}^{2B} &= 0,002I_{a8}^{2B} + 0,02 = 0,002 \times 15,20 \text{ mA} + 0,02 = 0,05 \text{ mA} \\
\Delta I_{a3}^{2B} &= 0,002I_{a3}^{2B} + 0,02 = 0,002 \times 7,50 \text{ mA} + 0,02 = 0,04 \text{ mA} & \Delta I_{a9}^{2B} &= 0,002I_{a9}^{2B} + 0,02 = 0,002 \times 16,88 \text{ mA} + 0,02 = 0,05 \text{ mA} \\
\Delta I_{a4}^{2B} &= 0,002I_{a4}^{2B} + 0,02 = 0,002 \times 8,97 \text{ mA} + 0,02 = 0,04 \text{ mA} & \Delta I_{a10}^{2B} &= 0,002I_{a10}^{2B} + 0,02 = 0,002 \times 18,57 \text{ mA} + 0,02 = 0,06 \text{ mA} \\
\Delta I_{a5}^{2B} &= 0,002I_{a5}^{2B} + 0,02 = 0,002 \times 10,47 \text{ mA} + 0,02 = 0,04 \text{ mA} & \Delta I_{a11}^{2B} &= 0,002I_{a11}^{2B} + 0,02 = 0,002 \times 20,31 \text{ mA} + 0,02 = 0,06 \text{ mA} \\
\Delta I_{a6}^{2B} &= 0,002I_{a6}^{2B} + 0,02 = 0,002 \times 12,00 \text{ mA} + 0,02 = 0,04 \text{ mA}
\end{aligned}$$