

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

<b>I. Введение</b>	<b>2</b>
Цель . . . . .	2
Задачи . . . . .	2
Приборы и оборудование . . . . .	2
<b>II. Теоретическая часть</b>	<b>3</b>
1. Диод . . . . .	3
2. Обработка и построение графиков . . . . .	4
2.1     Функция теоретического графика крутизны $S$ . . . . .	4
3. Вычисление погрешностей . . . . .	5
3.1     Приборная погрешность источника питания постоянного тока Б5-50 . . . . .	5
3.2     Приборная погрешность GDM-8245 при измерении постоянного тока . . . . .	5
3.3     Косвенная погрешность крутизны $S$ . . . . .	5
<b>III Практическая часть</b>	<b>7</b>
1. Исследование лампы диода . . . . .	7
1.1     Снятие статической характеристики диода . . . . .	7
2. Исследование лампы триода . . . . .	7
2.1     Расчет предельной мощности . . . . .	7
<b>IV Вывод</b>	<b>10</b>
<b>V. Контрольные вопросы</b>	<b>11</b>
<b>VI Приложение</b>	<b>12</b>
Приложение 1. Вычисление величины крутизны $S$ . . . . .	12
Приложение 2. Вычисление погрешности постоянного тока $I_a$ . .	12
Приложение 3. Вычисление погрешности напряжения $U_a$ . . . . .	12
Приложение 4. Вычисление консвенной погрешности $S$ . . . . .	13
Приложение 5. Вычисление параметра $g$ . . . . .	14

# I. ВВЕДЕНИЕ

**Цель**

1

**Задачи**

2

**Приборы и оборудование**

1. Источник питания постоянного тока Б5-50;
2. Вольтметр универсальный GDM-8245;

## 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*). 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 эквидистантность 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. 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  $\frac{\text{mA}}{\text{В}}$  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 вольтамперной характеристике. Взяв небольшое приращение анодного напряжения  $\Delta U_a$  так, чтобы в этих пределах участок анодной характеристики можно считать линейным, по характеристике определим приращение тока  $\Delta I_a$ . И тогда

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

## 2. Обработка и построение графиков

### 2.1 Функция 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  $y = I_a$ :

$$y = gx^{3/2} \quad (4)$$

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

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

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

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

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

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

(5)

### 3. Вычисление погрешностей

#### 3.1 Приборная погрешность источника питания постоянного тока Б5-50

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

$$\Delta U_{\text{приб}} = \pm(0,5\%U + 0,1\%U_{\text{макс}}), \quad (6)$$

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:

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

(7)

#### 3.2 Приборная погрешность GDM-8245 при измерении постоянного тока

Приборная погрешность GDM-8245 при измерении постоянного тока:

$$\Delta I_{\text{приб}} = \pm(0,002 \cdot I + 2 \cdot dI) \quad (8)$$

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

#### 3.3 Косвенная погрешность крутизны $S$

Выведем формулу косвенной погрешности крутизны из формулы (3):

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

$$\Delta S = \sqrt{\left(\frac{\partial S}{\partial I_{a_1}} \Delta I_{a_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial S}{\partial I_{a_2}} \Delta I_{a_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial S}{\partial U_{a_1}} \Delta U_{a_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial S}{\partial U_{a_2}} \Delta U_{a_2}\right)^2} \quad (9)$$

$$\begin{aligned}
\Delta S &= \\
&= \sqrt{\frac{\Delta I_{a_1}^2}{(U_{a_2} - U_{a_1})^2} + \frac{\Delta I_{a_2}^2}{(U_{a_2} - U_{a_1})^2} + \frac{(I_{a_2} - I_{a_1})^2}{(U_{a_2} - U_{a_1})^4} \Delta U_{a_1}^2 + \frac{(I_{a_2} - I_{a_1})^2}{(U_{a_2} - U_{a_1})^4} \Delta U_{a_2}^2} = \\
&= \boxed{\frac{\sqrt{(\Delta I_{a_1}^2 + \Delta I_{a_2}^2)(U_{a_2} - U_{a_1})^2 + (\Delta U_{a_1}^2 + \Delta U_{a_2}^2)(I_{a_2} - I_{a_1})^2}}{(U_{a_2} - U_{a_1})^2}} \quad (10)
\end{aligned}$$

### III. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

#### 1. Исследование лампы диода

##### 1.1 Снятие статической характеристики диода

Таблица 1: ВАХ диода

$U_a$ , В	$I_a$ , мА
2	3,78
4	10,16
6	16,88
8	24,84
10	32,40
12	40,90
14	49,94
16	62,40
18	73,52
20	86,31

Таблица 2: Результаты вычислений погрешностей и крутизны

$\Delta U_a$ , В	$\Delta I_a$ , мА	$S$ , $\frac{\text{мА}}{\text{В}}$	$\Delta S$ , $\frac{\text{мА}}{\text{В}}$
0,31	0,03	—	—
0,32	0,04	3,19	0,71
0,33	0,05	3,36	0,77
0,34	0,07	3,98	0,94
0,35	0,08	3,78	0,92
0,36	0,10	4,25	1,07
0,37	0,12	4,52	1,17
0,38	0,14	6,23	1,65
0,39	0,17	5,56	1,52
0,40	0,19	6,40	1,79

В ходе эксперимента снята вольт-амперная характеристика диода. Результаты измерений зависимости анодного тока  $I_a$  от напряжения  $U_a$  представлены в табл. 1.

Крутизна характеристики  $S$  вычислена по (3) и занесена в табл. 2. Анализ показывает нелинейный рост крутизны с увеличением напряжения.

Погрешности  $\Delta U_a$  и  $\Delta I_a$  приняты равными приборным и вычислены по (7) и (8). Погрешность крутизны  $\Delta S$  рассчитана по (10).

На рис. 1 представлен график  $I_a(U_a)$  с экспериментальными точками и областями погрешностей. Теоретическая кривая построена по (5), из которой получен параметр:

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

Экспериментальные данные удовлетворительно согласуются с теоретической зависимостью в исследованном диапазоне напряжений.

#### 2. Исследование лампы триода

##### 2.1 Расчет предельной мощности

В соответствии с максимальной рассеиваемой мощностью лампы рассчитали максимально допустимый ток для напряжений в диапазоне  $U_a \in$

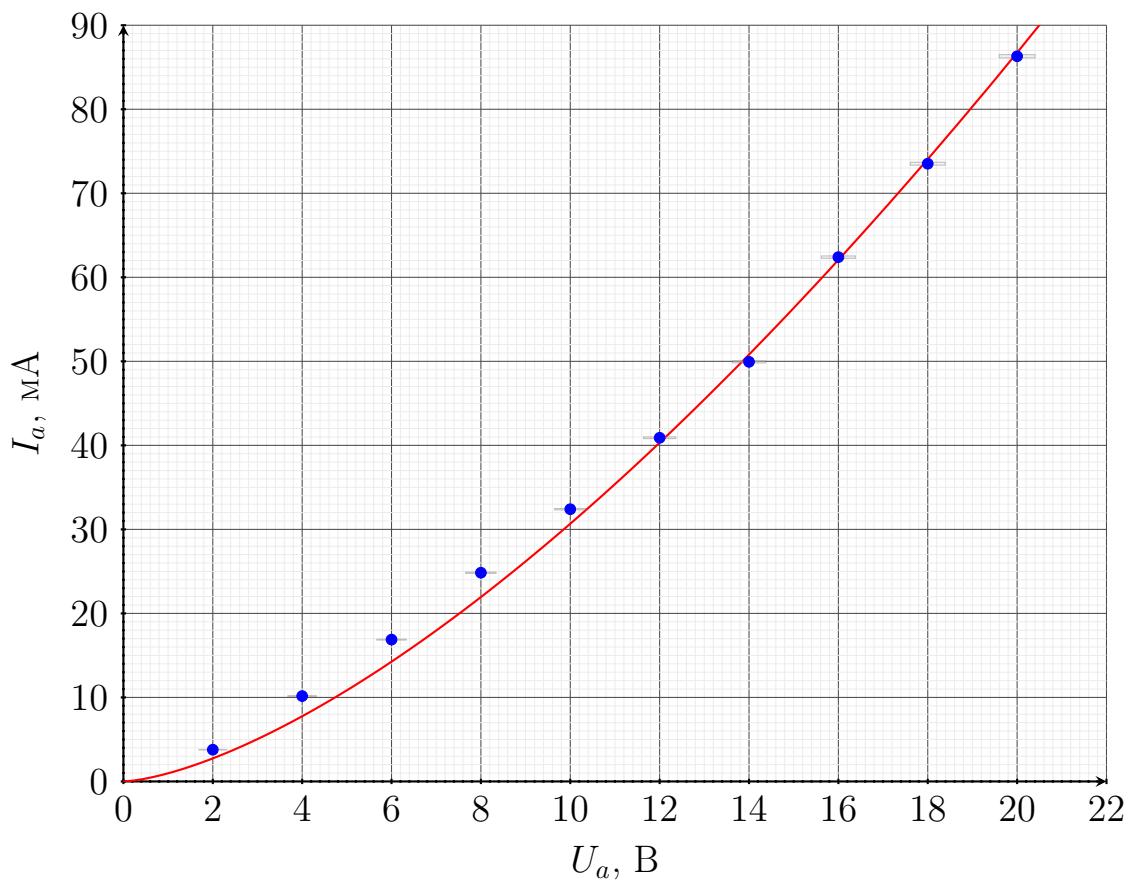


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика диода с погрешностями измерений и теоретической линией

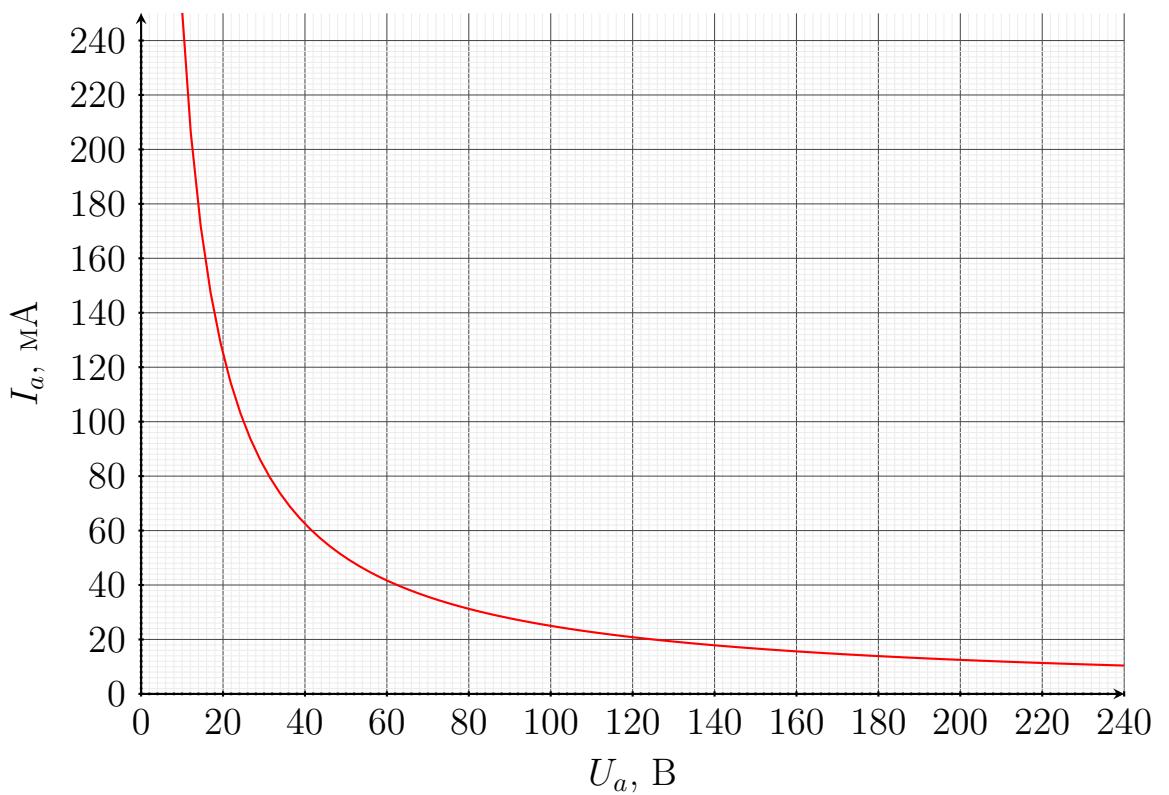


Рис. 2. Кривая максимально допустимого тока

[10...240] В.

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

$$I_a^{max} = \frac{P_{max}}{U_a} = \frac{2,5}{U_a} \quad (11)$$

Таблица 3: Максимальный допустимый ток

$U_a$ , В	$I_a$ , мА	$U_a$ , В	$I_a$ , мА	$U_a$ , В	$I_a$ , мА
10	250,00	90	27,78	170	14,71
20	125,00	100	25,00	180	13,89
30	83,33	110	22,73	190	13,16
40	62,50	120	20,83	200	12,50
50	50,00	130	19,23	210	11,90
60	41,67	140	17,86	220	11,36
70	35,71	150	16,67	230	10,87
80	31,25	160	15,63	240	10,42

## **IV. ВЫВОД**

Вывод к лабораторной работе

## V. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объясните качественно ход анодной характеристики лампы, включенной диодом.
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.
3. Каков будет анодный ток триода, если его сетку оставить никуда не подключенной?
4. Каков будет характер движения электронов, если на сетку подать большой положительный потенциал, а на анод небольшой отрицательный по отношению к катоду?
5. В чем отличие внутреннего сопротивления триода от его сопротивления постоянному току?
6. Чем определяются частотные свойства триода?

## VI. ПРИЛОЖЕНИЕ

Приложение 1. Вычисление величины крутизны  $S$

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

Приложение 2. Вычисление погрешности постоянного тока  $I_a$

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

Приложение 3. Вычисление погрешности напряжения  $U_a$

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

$$\begin{aligned}
\Delta U_{\text{приб}_4} &= 0,005U_{a_4} + 0,299 = 0,005 \times 8 \text{B} + 0,299 = 0,34 \text{B} \\
\Delta U_{\text{приб}_5} &= 0,005U_{a_5} + 0,299 = 0,005 \times 10 \text{B} + 0,299 = 0,35 \text{B} \\
\Delta U_{\text{приб}_6} &= 0,005U_{a_6} + 0,299 = 0,005 \times 12 \text{B} + 0,299 = 0,36 \text{B} \\
\Delta U_{\text{приб}_7} &= 0,005U_{a_7} + 0,299 = 0,005 \times 14 \text{B} + 0,299 = 0,37 \text{B} \\
\Delta U_{\text{приб}_8} &= 0,005U_{a_8} + 0,299 = 0,005 \times 16 \text{B} + 0,299 = 0,38 \text{B} \\
\Delta U_{\text{приб}_9} &= 0,005U_{a_9} + 0,299 = 0,005 \times 18 \text{B} + 0,299 = 0,39 \text{B} \\
\Delta U_{\text{приб}_{10}} &= 0,005U_{a_{10}} + 0,299 = 0,005 \times 20 \text{B} + 0,299 = 0,40 \text{B}
\end{aligned}$$

#### 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}} \\
\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}}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta S_9 &= \frac{\sqrt{(I_{a10}-I_{a9})^2(\Delta U_{a10}^2+\Delta U_{a9}^2)+(U_{a10}-U_{a9})^2(\Delta I_{a10}^2+\Delta I_{a9}^2)}}{(U_{a10}-U_{a9})^2} = \\ &= \frac{\sqrt{(0,17\text{mA}^2+0,19\text{mA}^2)(20,0\text{B}-18,0\text{B})^2+(0,39\text{B}^2+0,4\text{B}^2)(86,31\text{mA}-73,52\text{mA})^2}}{(20,0\text{B}-18,0\text{B})^2} = 1,79 \frac{\text{mA}}{\text{B}}\end{aligned}$$

## Приложение 5. Вычисление параметра $g$

$$\begin{aligned}g &= \frac{I_{a1}U_{a1}^{1,5}+\dots+I_{a10}U_{a10}^{1,5}}{U_{a1}^3+\dots+U_{a10}^3} = \\ &= \frac{10,0\text{B}^{1,5}\times32,4\text{mA}+10,16\text{mA}\times4,0\text{B}^{1,5}+12,0\text{B}^{1,5}\times40,9\text{mA}+14,0\text{B}^{1,5}\times49,94\text{mA}}{10,0\text{B}^3+12,0\text{B}^3+14,0\text{B}^3+16,0\text{B}^3+18,0\text{B}^3+2,0\text{B}^3+20,0\text{B}^3+4,0\text{B}^3+6,0\text{B}^3+8,0\text{B}^3} + \\ &+ \frac{16,0\text{B}^{1,5}\times62,4\text{mA}+16,88\text{mA}\times6,0\text{B}^{1,5}+18,0\text{B}^{1,5}\times73,52\text{mA}}{10,0\text{B}^3+12,0\text{B}^3+14,0\text{B}^3+16,0\text{B}^3+18,0\text{B}^3+2,0\text{B}^3+20,0\text{B}^3+4,0\text{B}^3+6,0\text{B}^3+8,0\text{B}^3} + \\ &+ \frac{2,0\text{B}^{1,5}\times3,78\text{mA}+20,0\text{B}^{1,5}\times86,31\text{mA}+24,84\text{mA}\times8,0\text{B}^{1,5}}{10,0\text{B}^3+12,0\text{B}^3+14,0\text{B}^3+16,0\text{B}^3+18,0\text{B}^3+2,0\text{B}^3+20,0\text{B}^3+4,0\text{B}^3+6,0\text{B}^3+8,0\text{B}^3} = 0,97 \frac{\text{mA}}{\text{B}^{\frac{3}{2}}}\end{aligned}$$