

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Волгоградский государственный технический университет»

Факультет Электроники и Вычислительной техники
Направление (специальность) 010700.62-физика
Кафедра Физика
Дисциплина Вакуумная и газоразрядная электроника

Утверждаю
Зав. кафедрой _____
«____» _____ 20____ г.

ЗАДАНИЕ на курсовую работу (проект)

Студент Чечеткин Илья Александрович
(фамилия, имя, отчество)

Группа Ф-469

1. Тема: «Модернизация лабораторного макета: Исследование статических характеристик триода»
Утверждена приказом от «24» октября 2013 г. №1569-ст
2. Срок предоставления работы (проекта) к защите «24» декабря 2013 г.
3. Содержание расчетно-пояснительной записки: Работа состоит из методического пособия из 5 частей:
 - 1) основные сведения;
 - 2) электродинамика триода;
 - 3) эквивалентный диод;
 - 4) описание экспериментальной установки;
 - 5) методика проведения эксперимента.
4. Перечень графического материала:

5. Дата выдачи задания «27» сентября 2013 г.

| | | |
|-------------------------------|---------------|--------------------|
| Руководитель работы (проекта) | _____ | _____ |
| | подпись, дата | инициалы и фамилия |
| Задание принял к исполнению | _____ | _____ |
| | подпись, дата | инициалы и фамилия |

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Волгоградский государственный технический университет»

Факультет Электроники и Вычислительной техники
Кафедра Физика

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА к курсовой работе (проекту)

по дисциплине Вакуумная и газоразрядная электроника
на тему «Модернизация лабораторного макета: Исследование статических
характеристик триода»

Студент Чечеткин Илья Александрович
(фамилия, имя, отчество)

Группа Ф-469

Руководитель работы (проекта) _____
подпись и дата подписания инициалы и фамилия

Члены комиссии:

| | |
|---------------------------|--------------------|
| _____ | _____ |
| подпись и дата подписания | инициалы и фамилия |
| _____ | _____ |
| подпись и дата подписания | инициалы и фамилия |
| _____ | _____ |
| подпись и дата подписания | инициалы и фамилия |

Нормоконтролер _____
подпись, дата подписания инициалы и фамилия

Волгоград, 2013г.

Содержание

| | |
|--|-----------|
| 1. Содержание работы | 4 |
| 1.1. Основные сведения | 4 |
| 1.1.1. Электродинамика плоского триода | 5 |
| 1.1.2. Эквивалентный диод | 9 |
| 2. Описание экспериментальной установки | 12 |
| 3. Методика проведения эксперимента | 13 |

1. Содержание работы

1.1. Основные сведения

Триод является вакуумным электронным прибором, отличающимся от диода наличием третьего электрода, расположенного между катодом и анодом и называемого управляющей сеткой или просто сеткой.

На рисунке 1 показаны распространенные конструкции электродов триода.

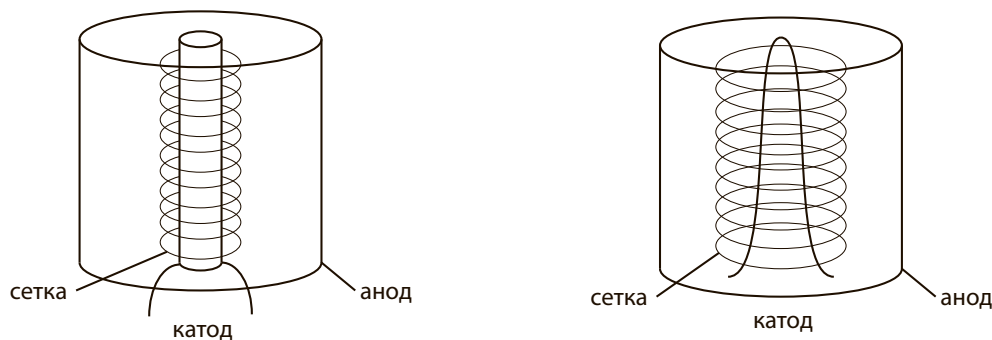


Рисунок 1. Конструкция электродов триода

Действие управляющей сетки заключается в том, что она регулирует распределение пространственного заряда между катодом и анодом и, таким образом, управляет потоком электронов внутри лампы, то есть анодным током. Вследствие того, что сетка не является сплошной, она свободно пропускает электроны, летящие к аноду. С другой стороны, она формирует структуру поля, причем резко ослабляется влияние изменения анодного напряжения на поле вблизи катода — экранирует катод от анода и ослабляет действие анода на электроны, вылетающие с катода.

Напряжением на сетке или сеточным напряжением называют разность потенциалов между сеткой и катодом, то есть потенциал сетки относительно катода. В лампах с катодом прямого накала все напряжения отсчитывают относительно отрицательного конца катода.

На рисунке 2 показано распределение поля в триоде при различных величинах напряжения на сетке и фиксированном анодном напряжении. Видно, что сетка задерживает большую часть поля. Чем гуще сетка, тем сильнее экранирует она катод от влияния анода. Вследствие этого и отчасти потому, что сетка расположена ближе к катоду, чем к аноду, небольшие изменения потенциала на сетке оказывают гораздо более сильное действие на анодный ток, чем значительные изменения потенциала на аноде.

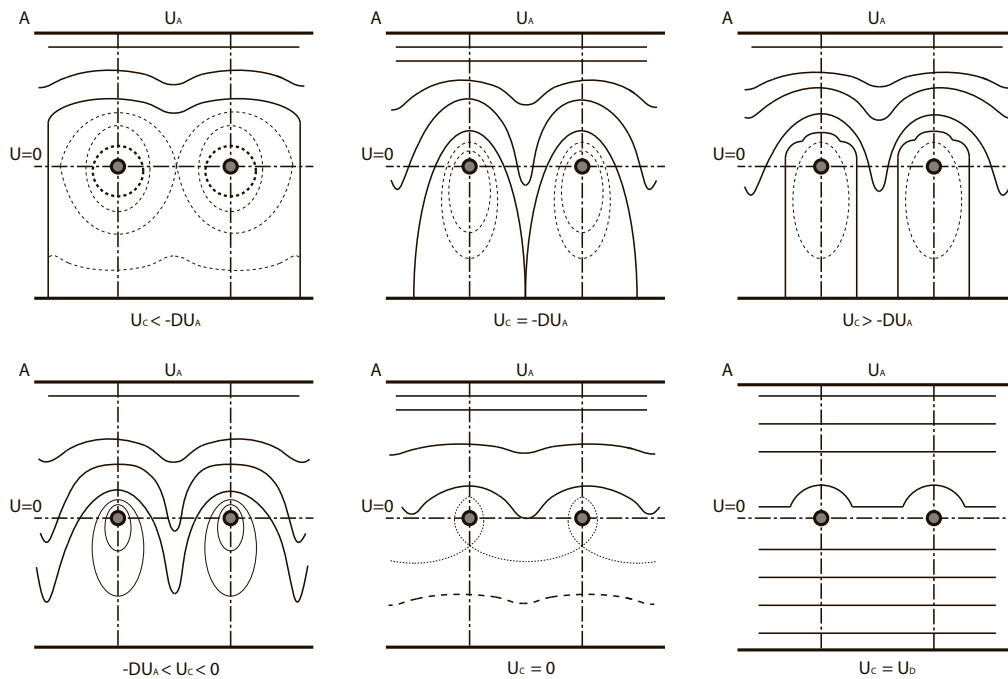


Рисунок 2. Распределение электростатического потенциала плоского триода при различных потенциалах сетки и одинаковом анодном напряжении

При небольшом отрицательном напряжении сетка отталкивает электроны, но часть их все же пролетает в ее просветы благодаря притяжению анода. Однако можно увеличить отрицательное напряжение настолько, что она будет отталкивать все электроны и анодный ток прекратится. Лампа будет заперта.

1.1.1. Электродинамика плоского триода

Для того, чтобы найти распределение потенциала в плоском триоде, найдем распределение потенциала в системе W_1 , показанной на рисунке 3.

W_1 состоит из трех цилиндрических электродов: катода, несущ-

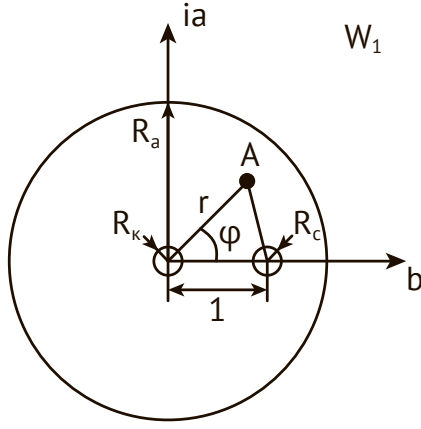


Рисунок 3. Комплексная плоскость W_1

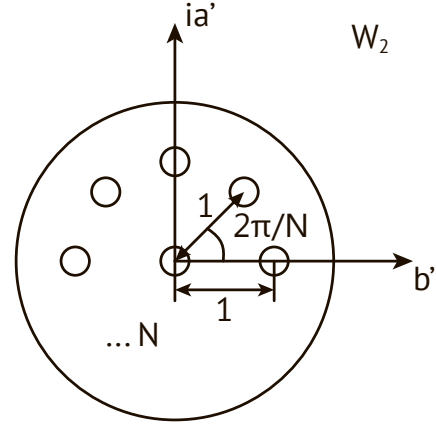


Рисунок 4. Комплексная плоскость W_2

щего заряд q_k и радиусом R_k , элемента сетки, несущего q_c и радиусом q_c , и анода, радиусом R_a . Между сеткой и катодом расстояние принято за единицу. Радиусы сетки и катода значительно меньше расстояний между сеткой и катодом и сеткой и анодом.

В точке A наводится следующий потенциал:

$$U(r, \varphi) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left[q_k \ln r + q_c \ln \sqrt{r^2 + 1 - 2r \cos \varphi} \right] + B. \quad (1)$$

Преобразуем комплексную плоскость по закону $W_2 = (W_1)^{1/N} = (re^{i\varphi})^{1/N}$, где N – некоторое число; получим систему W_2 , изображенную на рисунке 4.

Вместо одного элемента сетки в преобразованной системе будет N элементов, отстоящих друг от друга на угол $2\pi/N$ и удаленных от катода на расстояние, равном единице.

Преобразуем комплексную плоскость W_2 по закону

$$W = \ln(W_2) = \ln \left[(re^{i\varphi})^{1/N} \right] = \frac{1}{N} \ln r + i\varphi/N = x + iy.$$

Получим плоскость, изображенную на рисунке 5. В плоскости $x = 0$ лежит сетка, в плоскости $x = -d_{kc} = \ln \left[R_k^{1/N} \right]$ – катод, в плоскости $x = d_{ca} = \ln \left[R_a^{1/N} \right]$ – анод.

Из закона преобразования найдем связь между координатами

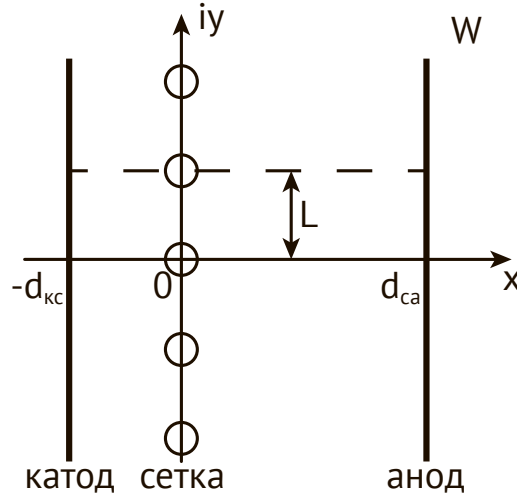


Рисунок 5. Комплексная плоскость W

x, y и r, φ :

$$x = \frac{1}{N} \ln r, \quad y = \varphi/N; \quad r = e^{xN}, \quad \varphi = yN.$$

Используя последнее соотношение, выразим число N через расстояние между элементами сетки L : $2\pi = LN$, откуда $N = 2\pi/L$. Тогда:

$$r = \exp\left(\frac{2\pi}{L}x\right), \quad \varphi = \frac{2\pi}{L}y.$$

Подставим это в (1):

$$U(x, y) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left[q_k \frac{2\pi}{L} x + q_c \ln \sqrt{e^{4\pi x/L} + 1 - 2e^{2\pi x/L} \cos \frac{2\pi}{L} y} \right] + B.$$

Граничные условия:

$$U(-d_{\text{кc}}, y) = 0,$$

$$U(0, R_C) = U_C,$$

$$U(d_{\text{са}}, y) = U_A,$$

где $R_C = \ln [R_c^{1/N}]$.

Из первого условия найдем константу B .

$$0 = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left[-q_k \frac{2\pi}{L} d_{\text{кc}} + \frac{q_c}{2} \ln \left(e^{-4\pi d_{\text{кc}}/L} + 1 - 2e^{-2\pi d_{\text{кc}}/L} \cos \frac{2\pi}{L} y \right) \right] + B.$$

Так как $L \ll d_{\text{кк}}$, то экспонентами относительно единицы можем пренебречь, и тогда:

$$B = \frac{q_k d_{\text{кк}}}{L \varepsilon_0}.$$

Таким образом,

$$U(x, y) = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \left[q_k \frac{2\pi}{L} (x + d_{\text{кк}}) + \frac{q_c}{2} \ln \left(e^{4\pi x/L} + 1 - 2e^{2\pi x/L} \cos \frac{2\pi}{L} y \right) \right]. \quad (2)$$

Из второго условия найдем U_C :

$$U_C = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \left[q_k \frac{2\pi}{L} d_{\text{кк}} + q_c \ln \left(2 \sin \frac{\pi}{L} R_C \right) \right]. \quad (3)$$

Из третьего – U_A , учитывая, что $d_{\text{са}} \gg \gg L$:

$$U_A = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \left[q_k \frac{2\pi}{L} d_{\text{ка}} + q_c \frac{2\pi}{L} d_{\text{са}} \right], \quad (4)$$

где $d_{\text{са}} = d_{\text{кк}} + d_{\text{са}}$ – расстояние от катода до анода.

Решая систему из уравнений (3) и (4) относительно неизвестных зарядов q_k и q_c и подставляя их в (2), получим:

$$U(x, y) = \frac{\left\{ -U_A \frac{L}{2\pi} \ln \left[2 \sin \left(\frac{\pi R_C}{L} \right) \right] + U_C d_{\text{са}} \right\} \cdot (x + d_{\text{кк}})}{\left\{ d_{\text{ак}} d_{\text{кк}} - d_{\text{ка}} \frac{L}{2\pi} \ln \left[2 \sin \left(\frac{\pi R_C}{L} \right) \right] \right\}} +$$

$$+ \frac{\frac{L}{4\pi} \ln \left[1 + \exp \left(\frac{4\pi x}{L} \right) - 2 \exp \left(\frac{2\pi x}{L} \right) \cos \left(\frac{2\pi y}{L} \right) \right] \cdot (U_A d_{\text{кк}} - U_C d_{\text{ка}})}{\left\{ d_{\text{ак}} d_{\text{кк}} - d_{\text{ка}} \frac{L}{2\pi} \ln \left[2 \sin \left(\frac{\pi R_C}{L} \right) \right] \right\}}.$$

Усредним данный потенциал в плоскости сетки $U(0, y)$ в пределах между элементами, учитывая, что $L \ll d_{\text{са}}, d_{\text{ск}}, d_{\text{ка}}$. Данный потенциал будет называться действующим. Его можно свести к виду

$$U_D = \sigma(U_C + DU_A), \quad (5)$$

где коэффициент

$$D = \frac{1}{\pi d_{ca}} \int_{R_C}^{L/2} \ln \left[\frac{\sin \left(\frac{\pi y}{L} \right)}{\sin \left(\frac{\pi R_C}{L} \right)} \right]$$

носит название проницаемости сетки, а σ – острота управления:

$$\sigma = 1 + \left(\frac{1}{d_{ac}} + \frac{1}{d_{ck}} \right) \frac{L}{2\pi} \ln \frac{L}{2\pi R_C}.$$

1.1.2. Эквивалентный диод

В общем случае анализ электроники триода основан на формуле (5).

Тогда, если предположить, что все электроны, пересекающие область сетки, достигают анода, прохождение тока можно описать, введя представление эквивалентного диода, то есть такого диода, у которого плоскость анода совпадает с плоскостью сетки в триоде. В этом случае катодный ток подчиняется классическому закону Ленгмюра:

$$I_k = P(U_C + DU_A)^{3/2}. \quad (6)$$

В этом случае условие прекращения анодного тока соответствует равенству

$$U_C = -DU_A. \quad (7)$$

При увеличении напряжения на сетке (но при условии, что $U_C < 0$) анодный ток совпадает по величине с катодным и растет по закону Ленгмюра (6).

В результате характер изменения анодного тока в триоде может быть описан двумя характеристиками: анодно-сеточной, когда при фиксированном анодном напряжении изменяется напряжение на сетке (рис. 6), и анодной, когда напряжение на сетке остается постоянным, но варьируется величина напряжения на аноде (рис. 7). Обе характеристики взаимосвязаны — и по семейству анодно-сеточных характеристик легко построить анодную.

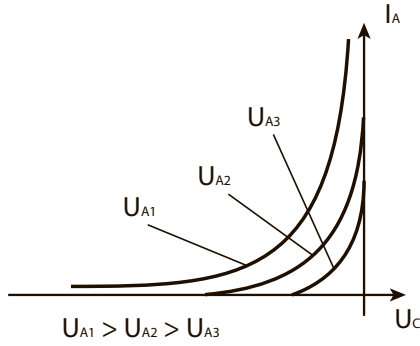


Рисунок 6. Семейство анодно-сеточных характеристик триода

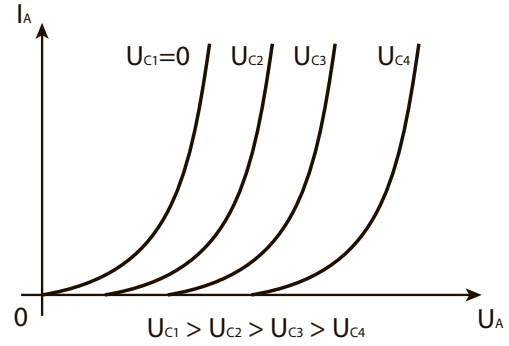


Рисунок 7. Семейство анодных характеристик триода

Однако при положительных напряжениях на сетке картина существенно изменяется. Когда $U_A > U_D$, все электроны, пролетевшие плоскость сетки, попадают на анод и сеточный ток определяется лишь теми электронами, которые перехватываются сеткой при их прямом движении к аноду. Такой режим носит название *режима токоперехвата*. Он существует до тех пор, пока напряжение на аноде не сравняется с действующим напряжением. Это означает, что граничный потенциал на сетке определяется условием $U_A = U_D$, или

$$\left(\frac{U_A}{U_C}\right)_{gr} = \frac{\sigma}{1 - D\sigma}.$$

Начинается этот режим при положительных напряжениях на сетке.

Введем коэффициент токопрохождения $s = I_a/I_k$ и коэффициент токораспределения $k = I_a/I_c$. Оба эти коэффициента равнозначны, но чаще используют коэффициент s , зная который легко определяются величины всех токов:

$$I_a = sI_k; \quad I_c = (1 - s)I_k.$$

Самая простая оценка величины коэффициента токопрохождения в режиме токоперехвата может быть сделана при сравнении характера траекторий электронов, когда напряжение на сетке равно

действующему: $U_C = U_D$, или

$$\left(\frac{U_A}{U_C}\right)_1 = \left(\frac{1}{\sigma} - 1\right) \frac{1}{D}; \quad s = s_1.$$

В этом случае распределение потенциала в плоском триоде практически совпадает с распределением потенциала в плоском диоде с расстоянием между анодом и катодом равном расстоянию между сеткой и катодом. При $\left(\frac{U_C}{U_D}\right) < 1$ витки сетки отталкивают электроны, число электронов, перехватываемых сеткой, уменьшается и s становится больше s_1 . При $\left(\frac{U_C}{U_D}\right) > 1$ витки сетки начинают играть роль рассеивающей линзы.

Оценить величину коэффициента токопрохождения можно достаточно просто. В случае $s = s_1$ на сетку будут попадать лишь те электроны, которые вылетают из катода прямо под сеткой. Тогда, если эмиссия из катода равномерна, $s_1 = 1 - \frac{2R_C}{L}$. При $\left(\frac{U_C}{U_D}\right) < 1$ коэффициент токопрохождения растет, при $\left(\frac{U_C}{U_D}\right) > 1$ – падает, причем изменение s связано с изменением эффективного электрического радиуса сетки $R_{C\text{эфф}}$ – радиуса, который определяет попадание электрона на сетку.

Когда $U_D > U_A$, в промежутке между сеткой и анодом на электроны действует тормозящее поле и не все электроны долетают до

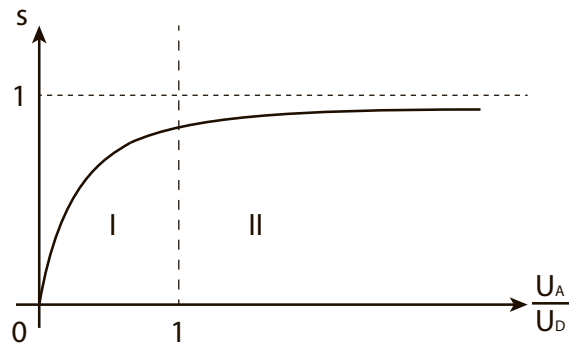


Рисунок 8. Кривая токораспределения в плоском триоде
1 – область возврата электронов; 2 – область токоперехвата

анода. Такой режим носит название *режима возврата электронов*. Ток сетки при этом в основном определяется теми электронами, которые возвращаются от анода к сетке.

На рисунке 8 приведены типичные кривые токораспределения (без учета начальных скоростей электронов и полей пространственного заряда).

2. Описание экспериментальной установки

На рисунке 9 приведен внешний вид экспериментальной установки по изучению статических характеристик триода.

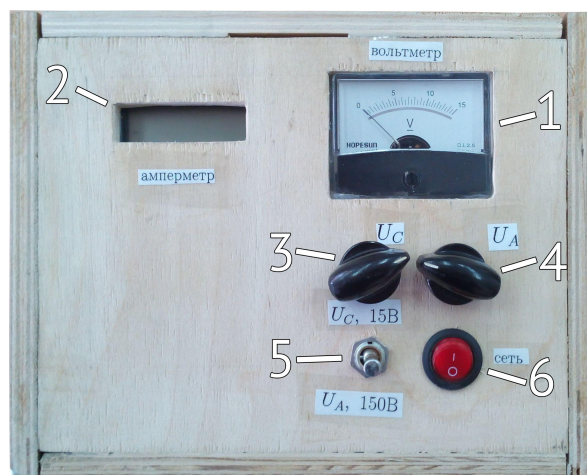


Рисунок 9. Внешний вид экспериментальной установки

1. Вольтметр.
2. Амперметр.
3. Регулятор сеточного напряжения.
4. Регулятор анодного напряжения.
5. Переключатель измеряемого напряжения.
6. Выключатель сетевого напряжения.

Принципиальная схема экспериментальной установки представлена на рисунке 10.

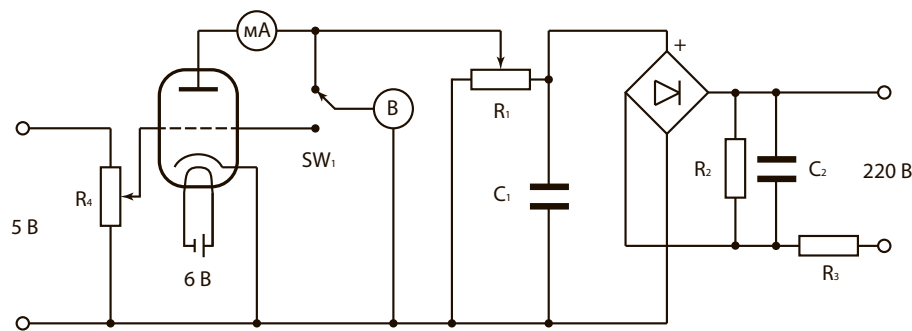


Рисунок 10. Принципиальная электрическая схема установки

3. Методика проведения эксперимента

- 4.1. Включив сеть, дать прибору прогреться не менее 3 мин.
- 4.2. Переключатель 5 должен находиться в положении « U_A », а регулятор 3 должен быть повернут вправо до упора.
- 4.3. Подать на анод максимально возможное напряжение регулятором 4 ($U_{a_m} \sim 40$ В). Зафиксировать значение анодного тока.
- 4.4. Переключив тумблер 5 в положение « U_C », повысить по модулю напряжение на сетке на одно деление регулятором 3. Переключить 5 в положение « U_A » и регулятором 4 вернуть напряжение на аноде к U_{a_m} . Записать значение анодного тока.

Таблица 1. Семейство анодно-сеточных характеристик

| | | | | | | | | |
|----------------------|----------------------------|--|--|--|--|--|--|--|
| U_{a01} | U_c , В | | | | | | | |
| | I_{a1} , мА | | | | | | | |
| | I_{a2} , мА | | | | | | | |
| | I_{a3} , мА | | | | | | | |
| | $\langle I_a \rangle$, мА | | | | | | | |
| U_{a02} и т. д. | U_c , В | | | | | | | |
| | I_{a1} , мА | | | | | | | |
| | I_{a2} , мА | | | | | | | |
| | I_{a3} , мА | | | | | | | |
| | $\langle I_a \rangle$, мА | | | | | | | |

- 4.5. Повторяя пункт 4 для различных U_{am} , снять зависимость $I_a(U_c)$ при $U_a = \text{const}$. Данные занести в таблицу 1.
- 4.6. Зафиксировав напряжение на сетке регулятором 3, изменять напряжение на аноде регулятором 4 и снять зависимость $I_a(U_a)$ при $U_c = \text{const}$.
- 4.7. Повторить пункт 6 для различных напряжениях на сетке $U_c = \text{const}$. Результаты занести в таблицу 2.

Таблица 2. Семейство анодных характеристик триода

| | | | | | | | | |
|----------------------|-----------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|
| U_{c01} | $U_a, \text{ В}$ | | | | | | | |
| | $I_{a1}, \text{ мА}$ | | | | | | | |
| | $I_{a2}, \text{ мА}$ | | | | | | | |
| | $I_{a3}, \text{ мА}$ | | | | | | | |
| | $\langle I_a \rangle, \text{ мА}$ | | | | | | | |
| U_{c02} и т. д. | $U_a, \text{ В}$ | | | | | | | |
| | $I_{a1}, \text{ мА}$ | | | | | | | |
| | $I_{a2}, \text{ мА}$ | | | | | | | |
| | $I_{a3}, \text{ мА}$ | | | | | | | |
| | $\langle I_a \rangle, \text{ мА}$ | | | | | | | |

- 4.8. Построить графики анодно-сеточной и анодной характеристик на миллиметровой бумаге.
- 4.9. По экспериментально определенным анодно-сеточным характеристикам построить семейство анодных характеристик и сравнить с анодными характеристиками, полученными экспериментально.