

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

А.И. Аксенов
А.А. Шмидт

ТОКОПРОХОЖДЕНИЕ В ТРИОДНОЙ СИСТЕМЕ
Методические указания по выполнению лабораторной работы
для студентов технических направлений подготовки

Томск 2024

УДК 621.385
ББК 32.851
А42

Рецензент:

Климов А.С., профессор кафедры физики, доктор технических наук

Аксенов, Александр Иванович

А42 Токопрохождение в триодной системе: методические указания по выполнению лабораторной работы для студентов технических направлений подготовки / А.И. Аксенов, А.А. Шмидт. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2024. – 12 с.

Представлены методические указания по выполнению лабораторной работы «Токопрохождение в триодной системе» для студентов технических направлений подготовки

Одобрено на заседании каф. ЭП, протокол № 05-24 от 08.05.2024 г.

УДК 621.385
ББК 32.851

© Аксенов А.И., Шмидт А.А. 2024
© Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2024

Оглавление

1	Введение	4
2	Теоретическая часть	4
3	Описание экспериментальной установки.....	7
4	Порядок выполнения работы.....	8
5	Контрольные вопросы.....	10
6	Содержание отчета	10
7	Список рекомендуемой литературы	11
	Приложение 1 (справочное) Основные и предельные параметры триода 6Н18Б-В.....	12

1 Введение

Цель данной работы состоит в ознакомлении с практическим видом связей токов и напряжений в триодной системе путем их экспериментального исследования.

Знакомство с методикой получения статических характеристик вакуумного триодного промежутка, определение его параметров и выбором оптимального режима эксплуатации.

2 Теоретическая часть

Вакуумный триодный промежуток содержит эмиттер электронов – катод, коллектор электронов – анод, и управляющий электрод (сетка, модулятор) помещенный между анодом и катодом. Введение управляющего электрода дает возможность изменять величину анодного тока независимо от анодного напряжения. Управление анодным током производится путем изменения потенциала управляющего электрода. Управляющее действие сетки триода в режиме пространственного заряда основано на изменении глубины минимума потенциала перед катодом U_{\min} .

На рисунке 2.1 показано распределение потенциала в триодном промежутке при изменении потенциала сетки.

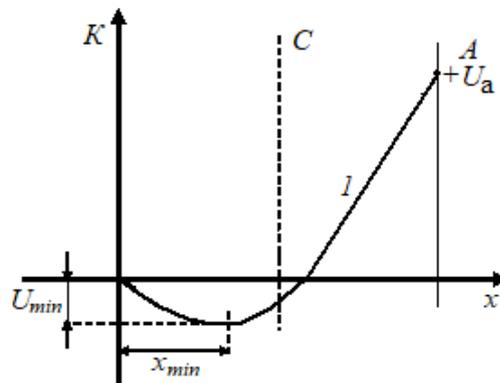


Рисунок 2.1 – Распределение потенциала в триодном промежутке

Напряженность электрического поля у катода, которая определяет величину катодного тока, существенно зависит от потенциала управляющего электрода. При отрицательных напряжениях на управляющем электроде у катода создается тормозящее поле (рисунок 2.1). Из кривой 1 видно, что на расстоянии x_{\min} от катода образуется минимум потенциала U_{\min} , следовательно, в этом пространстве от поверхности катода до x_{\min} действует тормозящее электрическое поле. Часть эмитированных электронов (энергия которых больше U_{\min}) преодолевают потенциальный барьер и уходят на анод. Другая часть электронов возвращается к катоду. В пространстве катод–управляющий электрод образуется объемный отрицательный заряд. Изменяя величину напряжения на управляющем электроде, можно изменять величину минимума потенциала U_{\min} и расстояние x_{\min} , тем самым изменять количество электронов преодолевающих потенциальный барьер и как следствие ток анода.

Наименьшее отрицательное напряжение на управляющем электроде, при котором анодный ток становится равным нулю, называют **напряжением запирания**.

Важное достоинство триодного промежутка заключается в том, что управление током анода происходит практически безынерционно.

Для сравнительной оценки воздействия полей анода и управляющего электрода на потенциальный барьер у катода вводят понятие **действующего напряжения**, которое учитывает воздействие как анодного, так и напряжения управляющего электрода. Ввиду того, что изменения напряжений на аноде и управляющем электроде приводят в основном к

изменению электрического поля в пространстве катод – управляющий электрод, было предложено заменить триодный промежуток некоторым эквивалентным диодным промежутком, анод которого находится на месте управляющего электрода триодного промежутка (рисунок 2.2).

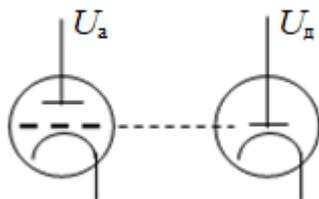


Рисунок 2.2 – Эквивалентный диодный промежуток

Выражение для действующего потенциала может быть представлено в следующем виде:

$$U_d = U_c + D \cdot U_a, \quad (2.1)$$

где U_d – действующее напряжение;

U_c – напряжение на управляющем электроде (сетке);

U_a – напряжение на аноде;

D – проницаемость управляющего электрода.

Проницаемость управляющего электрода характеризует степень проникновения поля анода в пространство управляющий электрод-катод и учитывает ослабление действия этого поля на потенциальный барьер у катода по сравнению с действием поля управляющего электрода.

Теоретическая связь токов с напряжениями на электродах в триодном промежутке, для случая использования плоских электродов, определяется соотношением:

$$I_a = 2,33 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{Q_a}{d_{c-к}^2} \cdot (U_c + D \cdot U_a)^{\frac{3}{2}}, \quad (2.2)$$

где I_a – ток анода;

Q_a – площадь действующей поверхности анода;

$d_{c-к}$ – расстояние между сеткой и катодом;

U_c – напряжение на управляющем электроде;

D – проницаемость управляющего электрода;

U_a – напряжение на аноде.

При отрицательном напряжении на сетке, которое наиболее часто встречается в практике использования триода, электроны не способны попадать на нее и выполняется соотношение $I_k = I_a$. В этом случае, как видно из приведенных соотношений, анодный ток в триоде подчиняется закону «степени 3/2», который определяет вид характеристик триода. Однако реальные характеристики триода отличаются обычно от теоретических, и поэтому для каждого типа триода проводятся в соответствующих справочниках, которыми необходимо пользоваться при выборе реального рабочего режима лампы. К основным статическим характеристикам лампы (триода) относятся следующие:

1. анодная – $I_a = f(U_a) \Big|_{U_c = const}$;
2. анодно-сеточная (характеристики управления) – $I_a = f(U_c) \Big|_{U_a = const}$

Для расчета устройств на основе триодного промежутка обычно используется величины, характеризующие ход характеристик в любой их точке, называемые статическими параметрами триода. К ним относятся следующие:

1. крутизна характеристики управления

$$S = \frac{dI_a}{dU_c} \quad \text{при } U_a = const ; \quad (2.3)$$

2. внутреннее сопротивление переменному току

$$R_i = \frac{dU_a}{dI_a} \quad \text{при } U_c = const ; \quad (2.4)$$

3. коэффициент усиления

$$\mu = \frac{dU_a}{dU_c} \quad \text{при } I_a = const , \quad (2.5)$$

где dI_a – приращение анодного тока;

dU_a – приращение напряжения на аноде;

dU_c – приращения напряжения на управляющем электроде.

Основные параметры триодов связаны между собой уравнением $\mu = S \cdot R_i$, которое может быть использовано как для нахождения одного из параметров по двум другим известным, так и для проверки результатов лабораторной работы.

Из сказанного выше видно, что статический режим работы триодного промежутка характеризуется постоянством напряжений на электродах при изменении тока в триодном промежутке. Это условие будет нарушаться, если в цепи электродов триодного промежутка (обычно в анодную цепь) включить последовательно резистор R_H (резистор нагрузки). В этом случае напряжение на аноде триодного промежутка оказывается зависимым от анодного тока, что видно из уравнения для анодной цепи

$$U_a = E_a + I_a \cdot R_H = E_a + U_{R_H} , \quad (2.6)$$

где E_a – напряжение источника питания анодной цепи;

R_H – сопротивление нагрузки.

Режим работы триодного промежутка с резистором в анодной цепи называется «нагрузочным».

Характеристики триодного промежутка в нагрузочном режиме существенно отличаются от статических характеристик. Нагрузочные характеристики управления оказываются более «пологими», чем статические.

Нагрузочная анодная характеристика в соответствии с уравнением (2.6) представляет прямую линию

$$I_a = \frac{E_a - U_a}{R_H} . \quad (2.7)$$

Поскольку в нагрузочном режиме ток анода I_a зависит не только от напряжения источников питания, но и от сопротивления нагрузки R_H нагрузочные параметры триодного промежутка также оказываются зависимыми от сопротивления нагрузки. Зависимость нагрузочной крутизны S_H от сопротивления нагрузки R_H приведена в формуле (2.8), а зависимость нагрузочного коэффициента усиления μ_H от сопротивления нагрузки в формуле (2.9):

$$S_H = \frac{S}{1 + \frac{R_H}{R_i}} . \quad (2.8)$$

$$\mu_n = \frac{\mu}{1 + \frac{R_i}{R_n}} \quad (2.9)$$

Рабочим режимом триодного промежутка является режим с отрицательным напряжением на управляющем электроде.

К числу параметров триодного промежутка относится допустимая предельная мощность $P_{\text{адоп}}$ – мощность, которую может рассеять анод. На рисунке 2.3 представлена кривая предельной мощности, с указанной допустимой для конкретного диодного промежутка рабочей областью.

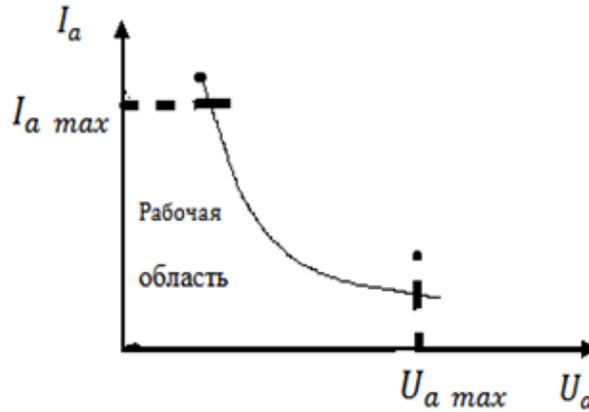


Рисунок 2.3 – Кривая предельной мощности

3 Описание экспериментальной установки

Лицевая панель модуля «Электровакуумные приборы» представлена на рисунке 3.1. На ней приведена мнемосхема и установлены коммутирующие и регулирующие элементы. На мнемосхеме изображены триоды VL2 и VL3.

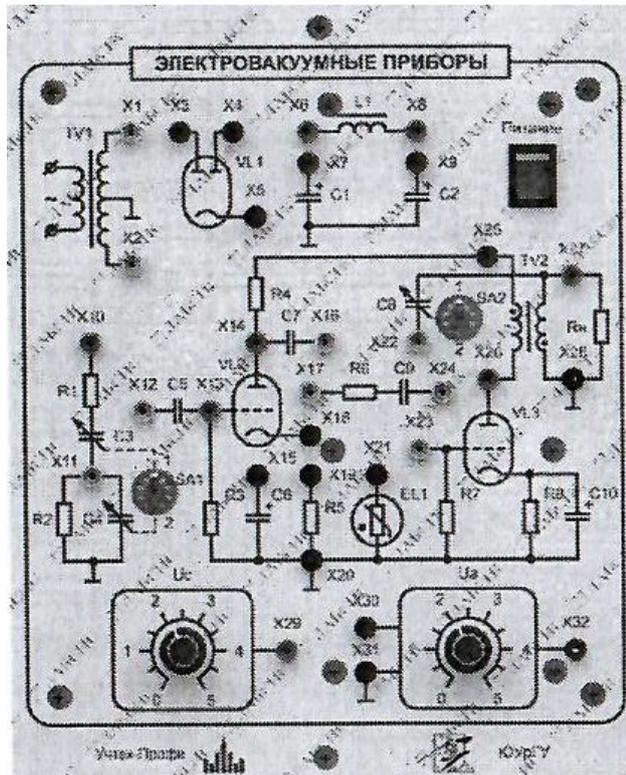


Рисунок 3.1 – Модуль «Электровакуумные приборы»

В качестве макета триодного промежутка используется сверхминиатюрный двойной триод 6Н18Б-В повышенной надежности и механической прочности в стеклянном оформлении с гибкими выводами. Основные и предельные параметры триода 6Н18Б-В приведены в приложении 1.

Модуль содержит два потенциометра. Потенциометр U_c позволяет задавать напряжение на управляющем электроде лампы (сетке), а U_a изменять анодное напряжение, как для снятия характеристик ламп, так и для питания ламповых каскадов в различных схемах включения.

Модуль «Мультиметры» (рисунок 3.2, а) включает с себя два цифровых прибора, используется в основном для измерения напряжений.

Модуль «Миллиамперметры» (рисунок 3.2, б) предназначен для выполнения измерений постоянных токов. Содержит два многопредельных миллиамперметра, выполненных на основе микроамперметров типа М42300, 0 – 100 мкА магнитоэлектрической системы.



Рисунок 3.2 – Модуль «Мультиметры» (а) и модуль «Миллиамперметры» (б)

Изменение пределов измерения в 10, 100, 1000 раз производится с помощью переключателей SA1 и SA2.

Внимание! Подключение миллиамперметров в параллельные цепи, как вольтметры, может вывести приборы из строя!

4 Порядок выполнения работы

- 1 Выписать из приложения 1 паспортные данные макета триодного промежутка.
- 2 Рассчитать и построить кривую предельной мощности, рассеиваемой на аноде в системе координат U_a, I_a .

3 Собрать схему для снятия статических характеристик триодного промежутка (рисунок 4.1). Сборка схемы исследований производится при отключенном источнике питания стенда. Схема может быть включена только после проверки ее преподавателем.

а) Соединить перемычками гнезда: X13 – X29, X18 – X20. Для измерения анодного тока включить многопредельный миллиамперметр (модуль «Миллиамперметры») на пределе « $\times 100$ » (максимальный ток 10 мА) между гнездами X32 – X14. Для измерения анодного напряжения между гнездами X14, X20 включить мультиметр (модуль «Мультиметры») в режиме измерения постоянного напряжения «V=», второй мультиметр в режиме измерения постоянного напряжения «V=» подключить к гнездам X29, X31 для измерения напряжения на управляющем электроде (сетке) макета триодного промежутка.

Включить питание стенда.

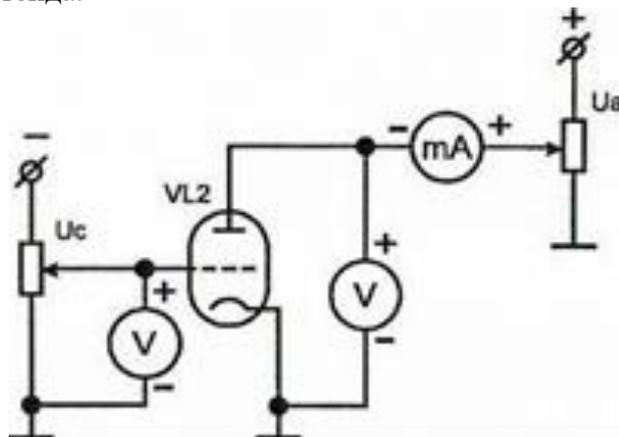


Рисунок 4.1 – Схема для снятия статических характеристик триодного промежутка

б) построить семейство анодных характеристик, устанавливая напряжение U_c с шагом заданным преподавателем.

в) последовательно снять по точкам анодные статические характеристики триода. Для этого потенциометром U_a изменяя напряжение на аноде, фиксировать анодный ток I_a и анодное напряжение U_a на триоде VL2.

г) снять семейство анодно-сеточных статических характеристик триода, для этого потенциометром U_a устанавливать напряжение на аноде с шагом заданным преподавателем.

д) последовательно снять по точкам анодно-сеточные характеристики триода. Для этого потенциометром U_c изменяя напряжение на сетке, фиксировать анодный ток I_a напряжение U_c на триоде VL2.

После выполнения эксперимента выключить питание модуля. Ручки потенциометров U_c и U_a установить в положение «0». По построенным характеристикам определить основные параметры триодного промежутка: крутизну характеристики S , внутреннее сопротивление R_i и коэффициент усиления μ .

4 Собрать схему для снятия динамических характеристик триодного промежутка (рисунок 4.2). Схема может быть включена только после проверки ее преподавателем.

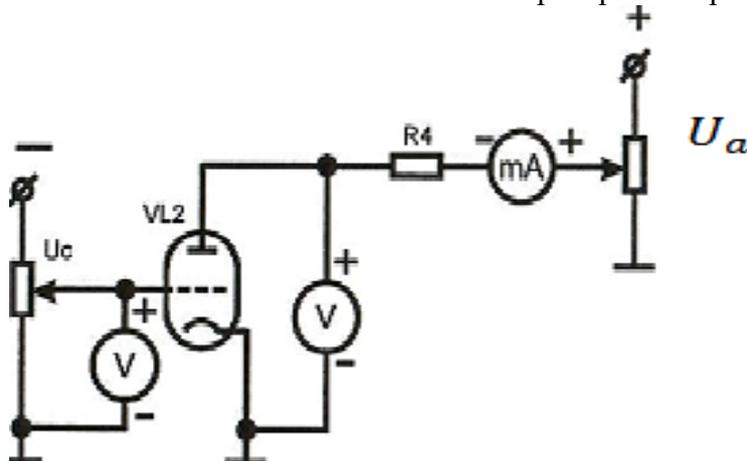


Рисунок 4.2 – Схема для снятия динамических характеристик триодного промежутка

а) Соединить перемычками гнезда: X13 – X29, X18 – X20. Для измерения анодного тока включить многопредельный миллиамперметр (модуль «Миллиамперметры») на пределе

«×100» (максимальный ток 10 мА) между гнездами X32 – X25. Для измерения анодного напряжения между гнездами X14, X20 включить мультиметр (модуль «Мультиметры») в режиме измерения постоянного напряжения «V=», второй мультиметр в режиме измерения постоянного напряжения «V=» подключить к гнездам X29, X31 для измерения напряжения на управляющем электроде (сетке) макета триодного промежутка.

Включить питание стенда.

б) используя семейство анодных статических характеристик, последовательно задавая напряжение на управляющем электроде (сетке) U_c с шагом семейства статических характеристик фиксируя U_a и I_a по точкам построить динамическую анодную характеристику.

в) снять по точкам динамическую характеристику управления триодного промежутка. Для этого потенциометром U_c изменяя напряжение на управляющем электроде (сетке), фиксировать анодный ток I_a и анодное напряжение U_a на триоде VL2.

г) снять характеристику управления триодного промежутка, для этого потенциометром U_a установить напряжение на аноде, заданное преподавателем.

д) снять по точкам характеристику управления триодного промежутка. Для этого потенциометром U_c изменяя напряжение на сетке, фиксировать анодный ток I_a и напряжение U_c на макете триодного промежутка (триоде VL2).

После выполнения эксперимента выключить питание модуля. Ручки потенциометров U_a и U_c , установить в положение «0»; по построенным характеристикам определить основные параметры триода: нагрузочную крутизну характеристики S_n , нагрузочного коэффициента усиления μ_n .

Обработка результатов измерений

1. Рассчитать и построить кривую предельной мощности, рассеиваемой мощности на аноде в системе координат U_a, I_a .

2. Построить графики зависимостей $I_a = f(U_a)$, $I_a = f(U_c)$.

3. Рассчитать по характеристикам параметры триода S, R_i, μ .

4. Построить динамические (нагрузочные) характеристики $I_a = f(U_a)$, $I_a = f(U_c)$.

5. Рассчитать динамические параметры триодного промежутка S_n, μ_n .

5 Контрольные вопросы

1. Чем отличаются анодная характеристика от характеристики управления триодного промежутка?
2. В чем состоит отличие статической и динамической характеристики?
3. Объясните назначение измерительных приборов для каждого опыта.
4. Объясните физический смысл крутизны характеристики S , внутреннего сопротивления R_i и коэффициента усиления μ .
5. Поясните, как влияет величина нагрузочного резистора в анодной цепи на величину нагрузочного коэффициента усиления.

6 Содержание отчета

Отчет должен содержать:

1. паспортные данные – основные параметры макета триодного промежутка (триода);
2. схемы для исследования характеристик триодного промежутка;
3. характеристики триодного промежутка;

4. результаты расчетов;
5. выводы.

Структура отчета:

1. титульный лист;
2. введение;
3. описание установки; методики эксперимента;
4. основные расчетные формулы;
5. результаты работы и их анализ;
6. выводы.

7 Список рекомендуемой литературы

1. Соболев В.Д. Физические основы электронной техники. – М.: Высш. школа, 1979. – 448 с.
2. Сушков А.Д. Вакуумная электроника. Физико-технические основы: учебное пособие / А. Д. Сушков. – Санкт-Петербург: Лань, 2022. – 464 с.
3. Шука, А. А. Электроника в 4 ч. Часть 1. Вакуумная и плазменная электроника: учебник для вузов / А. А. Шука, А. С. Сигов; под редакцией А. С. Сигова. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва: Издательство Юрайт, 2024. — 172 с.

Приложение 1
(справочное)
Основные и предельные параметры триода 6Н18Б-В



Лампа 6Н18Б-В

Частные технические условия
3.308.012 ТУ

Сверхминиатюрный двойной триод в стеклянном оформлении с гибкими выводами, с подогревными катодами, предназначенный, в основном, для работы в накопительных схемах усиления токов низкой частоты, генерирования токов высокой частоты, в радиотехнических устройствах.

1. Основные технические данные

Напряжение накала, В	6,3
Напряжение анода, В	100
Ток накала, мА	300—360
Ток анода, мА	4,4—8,2
Обратный ток сетки, мкА, не более	0,2
Ток утечки катод — подогреватель, мкА, не более	20
Крутизна характеристики, мА/В	3,75—6,25
Коэффициент усиления	18—28
Сопротивление в цепи каждого катода для автоматического смещения, Ом	325
Входная емкость, пФ	1,8—3,4
Выходная емкость, пФ	0,8—1,9
Пропускная емкость, пФ	0,8—2,0
Емкость между анодами, пФ, не более	0,65
Емкость катод — подогреватель, пФ, не более	7
Минимальная наработка, ч	1500
Критерии:	
— крутизна характеристики, мА/В, не менее	3
— обратный ток сетки, мкА, не более	0,5
— нестабильность крутизны характеристики, %, не более	+25 -30
Сохраняемость, лет	15
Длина лампы без выводов, мм, не более	38
Диаметр лампы, мм, не более	10,2
Длина выводов, мм, не менее	30
Диаметр выводов, мм	0,4

2. Предельно допустимые значения

Напряжение накала, В	5,7—6,9
Напряжение анода, В, не более	200
Напряжение анода при запертой лампе ($I_a \leq 5$ мкА), В, не более	350
Напряжение катод — подогреватель, В, не более	± 150
Сопротивление в цепи сетки, МОм, не более	1
Ток катода, мА, не более	12
Мощность, рассеиваемая анодом каждого триода, Вт, не более	0,9
Температура баллона при эксплуатации при нормальной температуре окружающего воздуха, °С, не более	+170