

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. Н.И.ЛОБАЧЕВСКОГО

Радиофизический Факультет

Кафедра электроники

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИНЦИПОВ
СТАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ
ЭЛЕКТРОННЫМ ПОТОКОМ
В ТРИОДЕ**

(Описание к лабораторной работе)

Нижний Новгород, 2004

УДК 621.380

Исследование принципов статического управления электронным потоком в триоде: Описание к лабораторной работе / Сост. И.Я.Ашбель, В.Н.Мануилов, В.Г.Павельев, М.И.Петелин. – Н.Новгород : ННГУ, 2004 –29с.

Описание содержит методические указания по выполнению лабораторной работы общего радиофизического практикума по курсу электроники.

Работа предназначена для студентов четвертого-пятого курсов радиофизического факультета.

Рис.13.

Составители:

канд. физ.-мат. наук, доцент И.Я.Ашбель,
доктор физ.-мат. наук, профессор В.Н.Мануилов,
канд. физ.-мат. наук, доцент В.Г.Павельев,
профессор М.И.Петелин.

Экспериментальное задание разработано канд. физ.-мат. наук, зав. лаб. А.П.Чиримановым.

Рецензент канд. физ.-мат. наук, снс ИПФ РАН М.Ю.Глявин.

Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского, 2004

Введение

В мощных электронных приборах СВЧ диапазона активной средой, из которой черпается энергия электромагнитного поля, служит поток свободных электронов, движущихся в вакууме. Для преобразования кинетической энергии электронов в энергию электромагнитного поля поток должен обладать определенными свойствами, главное из которых – наличие периодических сгустков в электронном пучке. Для формирования сгустков в электронике СВЧ используются два подхода – так называемые статический и динамический способы управления электронным пучком. Простейшим и исторически первым появился статический способ. Он нашел свое воплощение в электронных лампах с сеточным управлением. Многосеточные лампы со статическим управлением широко использовались в СВЧ электронике до начала 70-х годов 20-го века. Сейчас область применения классических многосеточных ламп сузилась. Тем не менее, принцип создания электронных сгустков путем статического управления электронным пучком и сейчас используется в более сложных и современных электронных приборах СВЧ, а также в новой отрасли электроники – вакуумной микроэлектронике СВЧ.

Наиболее простым примером такой системы является триод. Ниже излагается простейшая теория триода.

Устройство и принцип работы триода.

Триод отличается от диода наличием дополнительного электрода – сетки, расположенной между катодом и анодом. Поэтому анодный ток триода

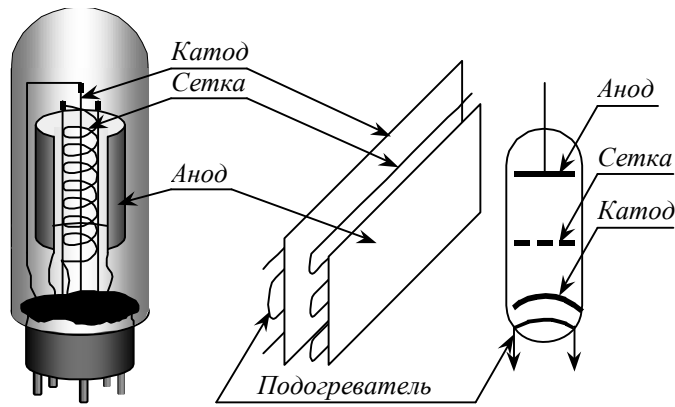


Рис. 1. Конструкция триода.

- Цилиндрический триод с катодом прямого накала.
- Плоский триод с подогреваемым катодом.
- Схематическое изображение триода в электронных схемах.

J_a может управляться не только изменением потенциала анода U_a , но и изменением потенциала сетки U_c , т.е.

$$J_a = J_a(U_c, U_a) \quad (1)$$

Триод является усилителем тока, а при определенных условиях, - и напряжения. *Основным рабочим режимом* триода является, как и в диоде, режим **ограничения тока пространственным зарядом**. Рассмотрим качественно, на примере простейшей плоской модели (рис.2) почему триод – усилитель тока? Плоская система, в отличие от рис. 1b, бесконечна в обоих направлениях. На рис. 2 изображено сечение модели, перпендикулярное проволочкам сетки.

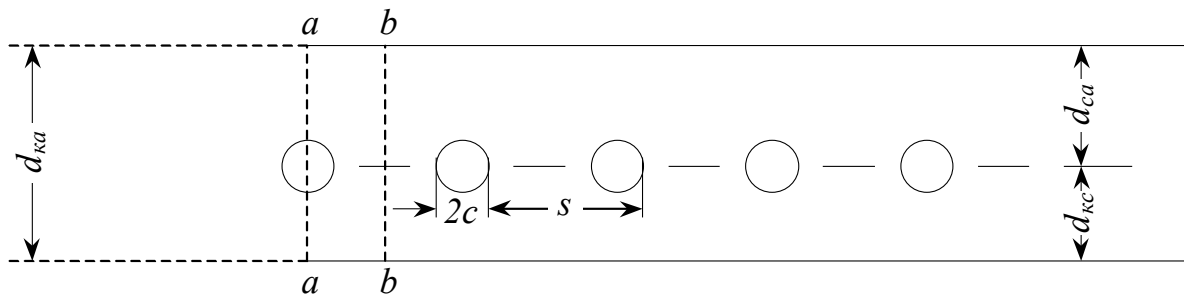


Рис. 2. Сечение плоской системы.

Сравним эффективность воздействия анодного U_a и сеточного U_c потенциалов на величину анодного тока J_a . Из рис.2 легко видеть, что электрическое поле, возникающее при подаче сеточного потенциала U_c беспрепятственно проникает на катод. В то же время поле, создаваемое потенциалом U_a проникает на катод только частично, поскольку часть его силовых линий перехватывается прутиками сетки – происходит *экранировка* анодного поля сеткой. Наконец, следует отметить, что сетка находится существенно ближе к катоду. Поэтому изменение потенциала U_c влияет на величину тока J_a гораздо сильнее, чем U_a . В результате, характерным свойством триода является то, что малые изменения потенциала сетки (а значит и сеточного тока J_c) приводят к большим изменениям анодного тока J_a .

На рис. 3 изображена схема усилителя тока, реализующая указанное свойство триода (для простоты в этой и последующих схемах подогреватель катода не показан).

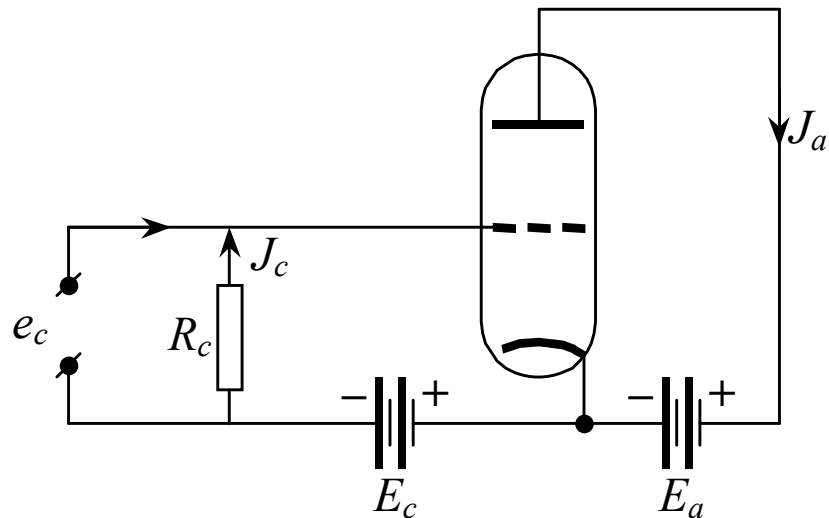


Рис. 3. Принципиальная схема усилителя тока на триоде.

Батарея E_a является источником анодного напряжения. Батарея смещения E_c служит для придания сетке некоторого постоянного отрицательного потенциала (необходимость такого смещения будет объяснена ниже). Если источник усищаемого тока e_c выключен, то потенциал сетки относительно катода $U_c = E_c$, и в анодной цепи течет ток J_{a0} , равный согласно (1) $J_a(E_c, E_a)$.

Вольт-амперные характеристики триода

Для описания свойств триода необходимо знать зависимости сеточного и анодного токов от подаваемых напряжений.

$$J_a = J_a(U_c, U_a) \quad (2)$$

$$J_c = J_c(U_c, U_a) \quad (3)$$

Наиболее важной для практических приложений является зависимость (2). Поскольку функция $J_a(U_c, U_a)$ является двумерной, для ее описания используют две «одномерные» зависимости

$$J_a = J_a(U_a) \quad \text{при } U_c = \text{const} \quad (4)$$

и

$$J_a = J_a(U_c) \quad \text{при } U_a = \text{const} \quad (5)$$

Первая зависимость (4) называется *анодной характеристикой*, вторая (5) – *анодно-сеточной*. Прямой путь определения зависимости (2) состоит в решении системы уравнений пучка, аналогично тому, как это делается в теории диода. В этом случае необходимо решать уравнение Пуассона и уравнения движения:

$$\begin{cases} \frac{d^2 U}{dx^2} + \frac{d^2 U}{dy^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_0} \\ m \frac{d\vec{v}}{dt} = -e\vec{E} \end{cases} \quad (6).$$

с учетом того, что $E = -\text{grad}U$ и $j = -\rho\vec{v}$, и при удовлетворении соответствующим граничным условиям на поверхностях анода, катода и сетки. Этот путь аналогичен выводу закона «трех вторых» для диода. В триоде электрическое поле и движение электронов двумерное, и аналитическое решение задачи наталкивается на серьезные математические трудности.

Попробуем использовать для получения зависимости $J_a = J_a(U_c, U_a)$ теорию диода. Прежде всего заметим, что **в диоде** $J_a = 0$ при $U_a \leq 0$. В триоде при $U_c = 0$ и $U_a > 0$, очевидно, часть анодного поля будет проникать сквозь сетку вплоть до катода, поэтому поле на поверхности катода будет ускоряющим, и будет идти анодный ток. Очевидно, для прекращения анодного тока необходимо подать на сетку отрицательный потенциал $U_c = U_{c3ап} < 0$. Этот потенциал называется *потенциалом запираения*.

Теперь найдем **ток катода** J_k . В **диоде** ток катода в режиме ограничения тока пространственным зарядом определяется из условия *равенства нулю полного поля* на его поверхности.

$$E_k = 0 \quad (7)$$

Величина E_k является суммой двух полей – поля электродов $E_{эл}$ и поля пространственного заряда пучка E_ρ :

$$E_k = E_{эл} + E_\rho = 0 \quad (8)$$

Поле $E_{эл}$ определяется геометрией электродов и потенциалами на них, т.е. это фактически поле «холодного» (без пучка) диода. Поле E_ρ – током пучка. Таким образом, режим ограничения тока пространственным зарядом наступает в диоде тогда, когда поле электронного пучка полностью компенсирует «холодное» поле электродов. Поэтому **ток катода определяется холодным полем на катоде $E_{эл}$** . Отсюда следует вывод, что если поля $E_{эл}$ в диоде и триоде равны, то равны и их **катодные** токи. Такой диод называется *эквивалентным диодом*. Но для плоского диода соответствующая задача имеет простое аналитическое решение

$$J_a = \frac{4}{9} \varepsilon_0 \sqrt{2\eta} S_a \frac{U^{3/2}}{d^2} \quad (9)$$

или, в общем случае

$$J_a = P U_a^{3/2} \quad (10)$$

Таким образом, задача свелась к определению соответствующих величин анодного напряжения U в эквивалентном диоде и зазора анод-катод d .

Начнем с нахождения d . Очевидно, эквивалентных диодов, имеющих одно и то же значение $E_{эл}$ можно построить бесконечно много (в плоском диоде $E_{эл} = U/d$, и при пропорциональном изменении U и d мы будем иметь одно и то же $E_{эл}$). Поэтому выберем из них такой эквивалентный диод, который автоматически дает правильный предельный переход в случае очень густой сетки в триоде. Очевидно, тогда анодный потенциал триода не оказывает влияния на $E_{эл}$ и мы фактически получаем диод, у которого анодный потенциал равен U_c , а зазор катод-анод – $d_{кc}$. Таким образом, в формуле (9) надо положить $d = d_{кc}$.

Величина U в (9) определяется из условия равенства холодных полей в триоде и эквивалентном диоде. Если предположить, что диаметр проволоки сетки 2ρ достаточно мал по сравнению с шагом s , а шаг, в свою очередь, мал по сравнению с расстояниями сетки до катода $d_{кc}$ и анода d_{ca} (эти предположения выполняются для практических конструкций триодов), то можно показать, что для плоского триода

$$E_{эл} = \frac{U_c + DU_a}{d_{кc} [1 + D(1 + d_{ca} / d_{кc})]}, \quad (11)$$

где

$$D \approx \frac{s}{2\pi d_{ca}} \ln \frac{s}{2\pi\rho}. \quad (12)$$

Коэффициент D определяет ту часть электрического поля вблизи катода, которая обусловлена присутствием анода и связана с «провисанием» потенциала U_a через промежутки между витками сетки. Как видно из (12), чем теснее расположены витки и чем толще проволока сетки, тем меньше D . Это позволяет назвать D *проницаемостью сетки*. Обычно $D \ll 1$, поэтому вместо (11) можно приближенно положить

$$E = \frac{1}{d_{кc}} (U_c + DU_a), \quad (13)$$

При $d = d_{кc}$ анодное напряжение эквивалентного диода равно согласно (13)

$$U_{экв} = Ed_{кc} = U_c + DU_a. \quad (14)$$

Эта величина получила название *эффективного или действующего потенциала*. Именно эту величину мы и должны подставить в качестве U в формулу (9).

Таким образом, **катодный ток** в плоском триоде

$$J_k = \frac{4}{9} \varepsilon_0 \sqrt{2\eta} S_a \frac{(U_c + DU_a)^{3/2}}{d_{кc}^2} \quad (15)$$

В общем случае

$$J_k = P(U_c + DU_a)^{3/2} \quad (16)$$

где P – первеанс триода.

Однако нашей конечной целью является вычисление *анодного тока*, который, согласно рис.1 равен сумме анодного и сеточного токов.

$$J_k = J_a + J_c \quad (17)$$

При $U_c < 0$ электроны не могут попасть на сетку, поскольку им это запрещает закон сохранения энергии. В самом деле, если предположить, что электрон перехватывается сеткой, то его скорость у поверхности сетки

$$v = \sqrt{2\eta U_c}$$

будет мнимой величиной. Таким образом, по крайней мере при $U_c < 0$ величина $J_a = J_k$ и, казалось бы, ее можно вычислить по формуле (16). В частности, из (16) следует, что $U_{сзат} = -DU_a$. Однако измерения показывают, что $|U_{сзат}| > DU_a$.

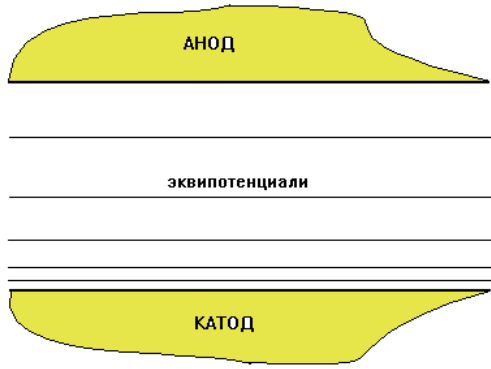
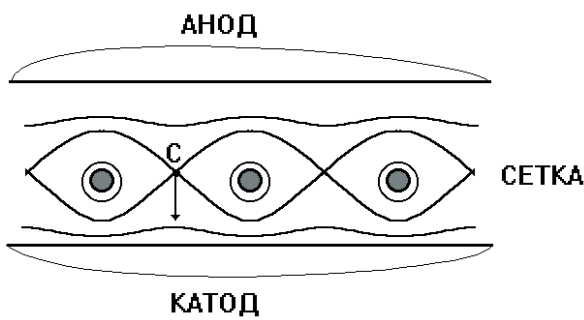


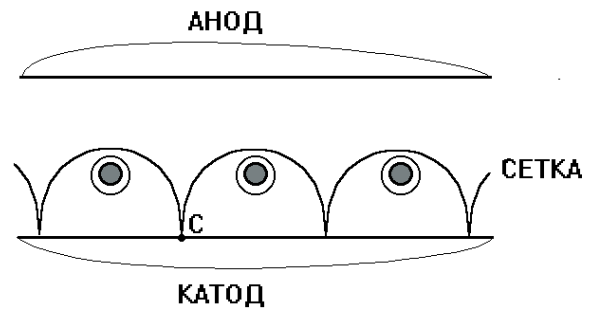
Рис.4. Эквипотенциали в плоском диоде.

. Причина заключается в **островковом эффекте**. Сравним форму эквипотенциалей в диоде и триоде. В диоде эквипотенциали – плоскости, параллельные поверхности катода (рис.4.). В то же время в триоде это далеко не всегда так. Проследим, как меняются эквипотенциали в холодном триоде по мере уменьшения $|U_c|$ (см. рис.5).



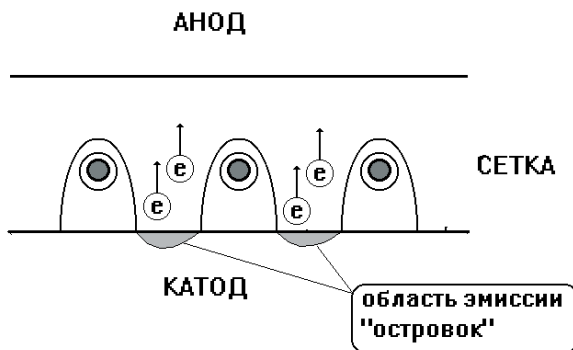
Форма эквипотенциалей при большом отрицательном смещении на сетке. Точка С – седловая точка. Стрелкой показано направление перемещения точки С по мере уменьшения $|U_c|$.

А)



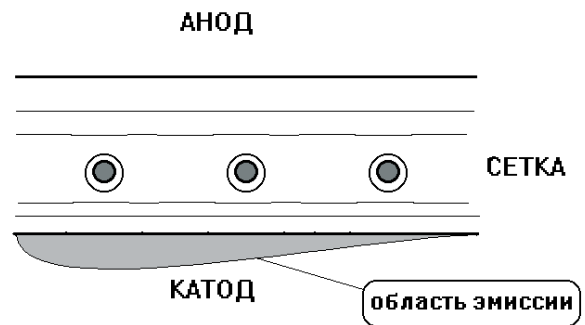
Нулевая эквипотенциаль в момент открытия триода.

Б)



Нулевая эквипотенциаль при островковом эффекте.

В)



Эквипотенциали при выполнении закона "3/2".

Г)

Рис. 5. Распределение потенциала и потенциальный рельеф в плоской системе.

На рис. 5 изображено несколько характерных распределений потенциала в плоской системе и соответствующие этим распределениям картины эквипотенциальных поверхностей. Распределения относятся к случаю отсутствия пространственного заряда (электронного потока нет – система «холодная») и различаются между собой значениями потенциала сетки. Из рис. 5 можно сделать следующие выводы:

- 1) Изменение потенциала сетки влияет в основном на электрическое поле между катодом и сеткой;
- 2) При потенциалах сетки, меньших некоторой величины U_{c3} , поле в любой точке поверхности катода делается тормозящим, а, следовательно, при $U_c < U_{c3}$ ток катода должен отсутствовать. U_{c3} называется запирающим потенциалом сетки или «потенциалом отсечки».
- 3) При потенциалах сетки выше запирающего ускоряющее поле анода достигает катода (положительные эквипотенциали «провисают» в промежутках между витками сетки). Как видно из рис. 5б и 5в, ускоряющее поле сначала образуется вблизи тех участков поверхности катода, которые лежат против зазоров между витками, а затем распространяется на весь катод. Таким образом, при повышении потенциала сетки сначала ток катода отбирается с указанных выше участков (**островной эффект**), а затем переходит на всю поверхность катода. Т.е. **площадь эмиссии является переменной величиной**, что не учитывается формулой (15).
- 4) При больших отрицательных U_c *распределение потенциала* имеет ярко выраженный *двумерный характер*, и лишь затем, по мере повышения потенциала сетки, эквипотенциальные поверхности вблизи катода постепенно принимают форму плоскостей, а распределение потенциала становится практически линейным (рис. 5г), что характерно для плоского диода. Таким образом, при больших отрицательных U_c *закон «3/2» не будет выполняться даже для плотности тока* вследствие *двумерности распределение потенциала*.

Цилиндрический триод (рис. 1а) и другие возможные системы имеют более сложное распределение потенциала. В частности, в цилиндрических триодах при потенциалах сетки выше запирающего эквипотенциальные поверхности вблизи катода приближаются по форме к круговым цилиндрам, а распределе-

ние потенциала – к логарифмическому, свойственному цилиндрическому конденсатору.

В целом можно констатировать, что вблизи точки запираия закон «3/2» не выполняется.

При положительных потенциалах сетки закон «3/2» для *катодного тока* выполняется, т.к. эквипотенциали близки к плоским. Однако при вычислении анодного тока необходимо учитывать распределение тока в триоде между сеткой и анодом (см. формулу (17)), т.е. располагать величиной коэффициента токораспределения:

$$K = \frac{J_a}{J_c}. \quad (18)$$

Вопрос о распределении тока между положительной сеткой и анодом принадлежит к числу наиболее сложных в теории триода. Для режимов с положительной сеткой¹ нахождение K возможно при конкретном учете особенностей траекторий электронов вблизи сетки, где электрическое поле существенно неоднородно.

Кроме того, определенный вклад в токи электродов вносится вторичной эмиссией. Так, если $U_a > U_c > 0$, то вторичные электроны с сетки идут на анод, увеличивая анодный и, соответственно, уменьшая сеточный токи. При $U_c > U_a > 0$ влияние вторичной эмиссии противоположно. Коэффициент вторичной эмиссии имеет большую величину при энергии первичных электронов $W \geq 100$ В, а т.к. триоды сравнительно редко применяются в режимах с $U_c > 100$ В, то наибольшее значение имеет анализ первичного токораспределения, т.е. нахождение K в пренебрежении вторичной эмиссией.

Пропорциональное изменение потенциалов всех электродов не меняет, как известно, траектории заряженных частиц в электрическом поле. Ввиду этого коэффициент токораспределения зависит от потенциалов анода и сетки через их отношение, т.е.

$$K = f\left(\frac{U_c}{U_a}\right). \quad (19)$$

¹ Эти режимы позволяют получать большие КПД при использовании триода в схемах мощных усилителей и генераторов.

Рассмотрим качественно вопрос об электронных траекториях при различных $\frac{U_c}{U_a}$. Можно выделить две области потенциалов:

- а) $\frac{U_c}{U_a} < 1$. Поле между сеткой и анодом *ускоряет* электроны в направлении анода.
- б) $\frac{U_c}{U_a} > 1$. Поле между сеткой и анодом *тормозящее*.

При некотором критическом отношении $\left(\frac{U_c}{U_a}\right)_{кр.}$ (часто оно порядка 1.3) компонента скорости электрона в направлении от сетки к аноду оказывается недостаточной для преодоления тормозящего поля, и электроны поворачивают к сетке. Таким образом, можно отметить два режима, существенно отличающихся по характеру траекторий.

$$1. \text{ Режим прямого перехвата } \left(\frac{U_c}{U_a}\right)_{кр.} \in \left[0 - \left(\frac{U_c}{U_a}\right)_{кр.}\right]$$

В пространстве между сеткой и анодом отсутствуют электроны, возвращающиеся к сетке. При изменении $\frac{U_c}{U_a}$ в указанных пределах K меняется только за счет изменения той доли электронов, которая непосредственно перехватывается витками сетки (рис. 6а) на пути к аноду. Величина K в режиме прямого перехвата удовлетворительно описывается формулой, получаемой в предположении прямолинейности траекторий электронов между катодом и анодом (см. [4]), т.е. приближенно равна отношению площадей анода и сетки.

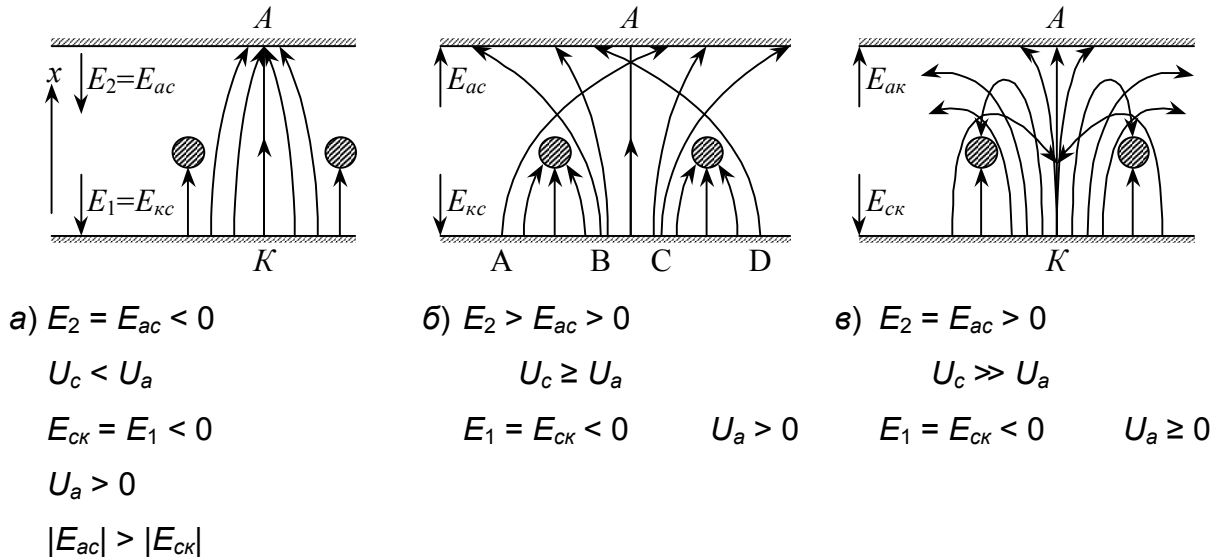


Рис. 6. Траектории электронов при различных режимах токораспределения.

2. Режим возврата $\left(\frac{U_c}{U_a}\right) > \left(\frac{U_c}{U_a}\right)_{кр.}$

Начиная с того момента, когда формируются траектории электронов, касающиеся поверхности анода (рис. 6б), в пространстве между сеткой и анодом появляются электроны, возвращающиеся к сетке. При увеличении $\frac{U_c}{U_a}$ число их быстро возрастает (рис. 6в). Для согласия величины K с опытными данными здесь необходимо учитывать существенное повышение плотности пространственного заряда между сеткой и анодом, связанное с наличием там замедленных электронов. Пространственный заряд вызывает понижение потенциала во всех точках области между сеткой и анодом, способствуя образованию минимума потенциала. Если U_{min} – потенциал минимума, то на анод попадут только те электроны, которые преодолевают тормозящую разность потенциалов $(U_c - U_{min})$. Легко видеть, что этот механизм смещает границу между режимами возврата и прямого перехвата в сторону больших $\frac{U_a}{U_c}$ и тем сильнее, чем больше ток.

Проведенное выше качественное рассмотрение позволяет нарисовать зависимости катодного, анодного и сеточного токов от потенциала сетки (рис.7).

На следующих рисунках 8 и 9 приведены также анодно-сеточные и анодные характеристики одного из промышленных триодов. Их вид понятен из данного выше качественного описания процесса формирования электронного потока в триоде. Остановимся только отдельно на объяснении анодной характеристики для $U_c > 0$. Как видно, при малых $U_a \rightarrow 0$ наблюдается очень резкое изменение анодного тока. Это связано с тем, что триод работает в режиме возврата (см. рис.6в и рис.7). Здесь происходит быстрое изменение коэффициента токораспределения K . В то же время, т.к. $DU_a \ll U_c$, то $J_k = P(U_c + DU_a)^{3/2} \approx \text{const}$. Далее, при достаточно больших U_a триод переходит в режим прямого перехвата и наблюдается медленный рост тока, связанный с ростом катодного тока по формуле $J_k = P(U_c + DU_a)^{3/2}$.

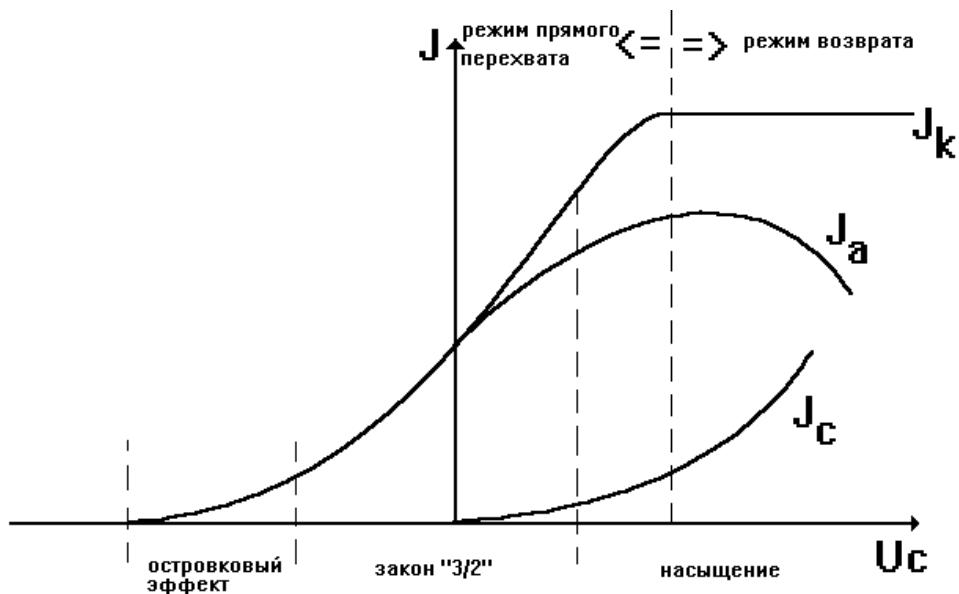


Рис.7.

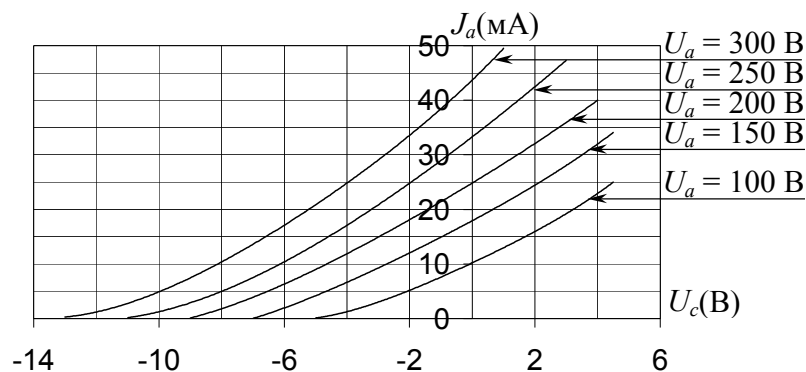


Рис. 8. Анодно-сеточные характеристики триода 6С1П.

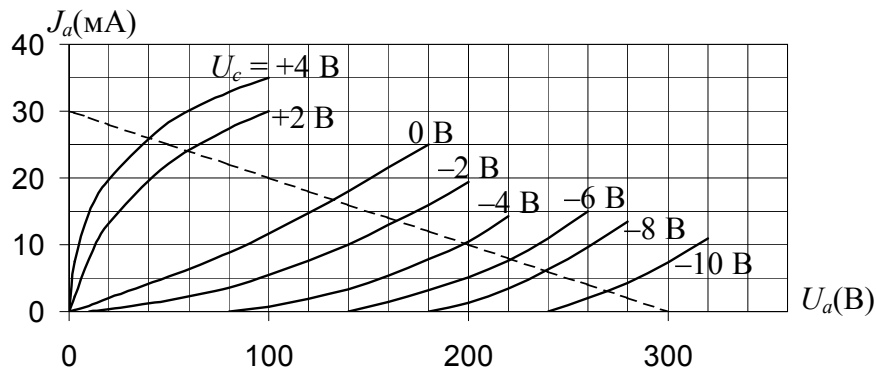


Рис. 9. Анодные характеристики триода.

При отрицательной сетке $J_a = J_k$, и, согласно (16),

$$J_a = P(U_c + DU_a)^{3/2}, \quad (20)$$

где через P обозначен первеанс эквивалентного диода (см. (16)). Формула (20) дает значительную погрешность вблизи точки отпирания триода. Тем не менее, ее можно использовать и в этом случае **для качественных оценок**. Рассмотрим особенности анодно-сеточных характеристик, вытекающие из (20):

а) каждая анодно-сеточная характеристика начинается со значения²

$$U_{c3} = -DU_a \quad (21)$$

и описывается соотношением

$$J_a = P(U_c - U_{c3})^{3/2}; \quad (22)$$

б) каждая анодная характеристика начинается с потенциала анода

$$U_{a3} = -\frac{U_c}{D} \quad (23)$$

и имеет вид

$$J_a = P(U_a - U_{a3})^{3/2}. \quad (24)$$

Таким образом, для анодных и анодно-сеточных характеристик в режимах при $U_c < 0$ типичным должно быть поведение, соответствующее закону

² Ранее мы называли величину U_{c3} запирающим потенциалом или потенциалом отсечки.

«трех вторых», а также постоянство отношений U_a/U_{c3} и U_c/U_{a3} . Указанные закономерности обычно выполняются для триода 6С1П, используемого в экспериментальной установке (см. рис. 8 и 9).

Параметры триода

Триод принято характеризовать тремя параметрами. Величина

$$S = \left(\frac{\partial J_a}{\partial U_c} \right)_{U_a} \quad (25)$$

является отношением бесконечно малых приращений анодного тока и напряжения на сетке и называется крутизной триода. S обычно выражается в единицах мА/В. Геометрически крутизна характеризует наклон кривых на рис. 8, из которого видно, что на большом протяжении характеристики почти линейны, а их наклон почти одинаков. Это позволяет заменять бесконечно малые приращения конечными, т.е. вместо (25) писать

$$S = \left(\frac{\Delta J_a}{\Delta U_c} \right)_{\Delta U_a=0} = \left(\frac{i_a}{u_c} \right)_{u_a=0} \quad (26)$$

Величина S , относящаяся к линейному участку, обычно приводится в таблицах вместе с другими параметрами ламп. Знание этих параметров позволяет рассчитывать в линейных режимах любую схему, содержащую триод.

Параметр

$$R_i = \left(\frac{\partial U_a}{\partial J_a} \right)_{U_c=const}, \quad (27)$$

называется внутренним сопротивлением. Геометрически этот параметр характеризует наклон анодных характеристик триода (рис.9), т.е. кривых, выражающих зависимость анодного тока от анодного напряжения при постоянном потенциале сетки.

Важнейшим свойством триода, определяющим его способность *усилить напряжение*, является то, что малые изменения потенциала сетки эквивалентны в смысле воздействия на анодный ток большим изменениям потенциала анода³, т.к. анод экранирован сеткой от катода и расположен от последнего дальше, чем сетка. Это свойство характеризуется статическим коэффициентом усиления по напряжению.

Обратимся еще раз к характеристикам на рис. 8. Изменение потенциала анода на 50 В (с 200 В до 250 В при потенциале сетки –2 В) дает увеличение тока J_a на 8 мА. Снижение потенциала сетки всего на 2 В (до –4 В) возвращает ток к прежнему значению. Отношение указанных приращений характеризует относительное воздействие электродов на анодный ток и называется статическим коэффициентом усиления. Точнее, *статическим коэффициентом усиления μ называется взятое с обратным знаком отношение бесконечно малых приращений потенциалов анода и сетки, при которых ток остается постоянным*, т.е.

$$\mu = - \left(\frac{\partial U_a}{\partial U_c} \right)_{J_a = \text{const}} . \quad (28)$$

На линейных участках характеристик бесконечно малые приращения можно заменить конечными, т.е.

$$\mu = - \left(\frac{\Delta U_a}{\Delta U_c} \right)_{\Delta J_a = 0} = - \left(\frac{u_a}{u_c} \right)_{i_a = 0} . \quad (29)$$

Статические параметры S , μ , R_i не являются независимыми, а, как легко проверить, связаны соотношением

$$\mu = S \cdot R_i, \quad (30)$$

которое называется внутренним уравнением триода. Для доказательства найдем полный дифференциал функции $J_a(U_c, U_a)$:

³ В еще большей степени это свойство присуще многосеточным лампам: тетрадам, пентодам и т. д.

$$dJ_a = \left(\frac{\partial J_a}{\partial U_c} \right)_{U_a} dU_c + \left(\frac{\partial J_a}{\partial U_a} \right)_{U_c} dU_a. \quad (31)$$

Индексы при частных производных означают, что в первом члене справа частная производная берется при постоянном анодном напряжении, а во втором – при постоянном напряжении на сетке. Представим, воспользовавшись определениями (25), (27) dJ_a из (31) в виде

$$dJ_a = SdU_c + \frac{1}{R_i} dU_a, \quad (32).$$

Теперь, приравняв полный дифференциал к нулю, и воспользовавшись определением μ (28), получаем соотношение (30).

Величина μ определяет предельный коэффициент усиления по напряжению. Типичная схема усилителя напряжения показана на рис. 10. По сравнению со схемой рис. 3 здесь добавлено сопротивление в анодной цепи, и при переменном анодном токе анодное напряжение более не является постоянным. Такой режим работы триода называется *динамическим*.

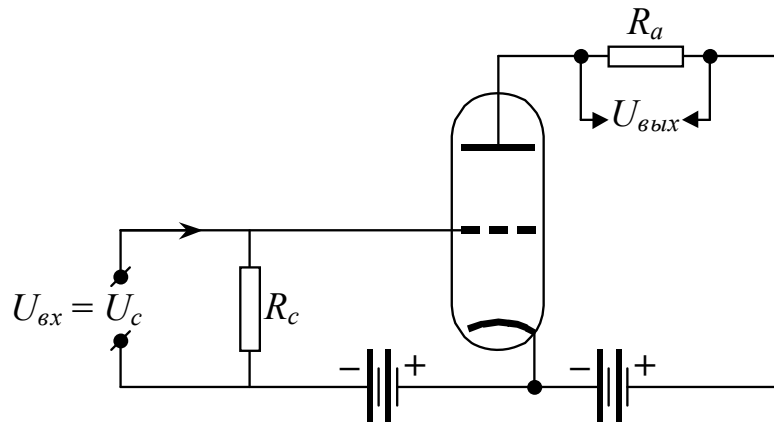


Рис. 10. Принципиальная схема усилителя напряжения.

Согласно схеме рис. 10

$$E_a = U_a + J_a R_a. \quad (33)$$

Поскольку $E_a = \text{const}$, то

$$dU_a = -R_a dJ_a = -dU_{\text{вых}}. \quad (34)$$

Зависимость (33) называется нагрузочной характеристикой.

Используя (32)–(34) и (30), найдем, что коэффициент усиления напряжения равен

$$K_U = \frac{dU_{\text{вых}}}{dU_{\text{вх}}} = -\frac{dU_a}{dU_c} = \frac{S}{\frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_a}} = \frac{SR_i}{1 + \frac{R_i}{R_a}} = \frac{\mu}{1 + \frac{R_i}{R_a}}. \quad (35)$$

Таким образом, коэффициент усиления всегда меньше μ . Для линейного режима можно записать:

$$K_U = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{\mu}{1 + \frac{R_i}{R_a}}. \quad (36)$$

Если $U_{\text{вых}}$ и $U_{\text{вх}}$ – гармонически изменяющиеся величины, то их отношение можно заменить отношением амплитуд. Поэтому в (36), (26) и (29) можно под i и u понимать амплитуды соответствующих токов и напряжений (при малых амплитудах).

Найдем статические параметры μ , S и R_i . В соответствии с (16) и (28) коэффициент усиления

$$\mu = -\left(\frac{\partial U_a}{\partial U_c}\right)_{J_a} = \frac{1}{D}. \quad (37)$$

Формула $\mu = \frac{1}{D}$ имела бы место и при любой другой зависимости анодного тока от анодного и сеточного потенциалов вида $f(U_c + DU_a)$. Если вспомнить, что $(U_c + DU_a)$ является эффективным потенциалом эквивалентного диода, то мы приходим к выводу, что (32) несправедливо, когда триод не сводится к эквивалентному диоду. Коэффициент усиления триода при «средних» потенциалах сетки является примерно постоянной величиной, уменьшаясь при потенциалах сетки, близких к запирающим (влияние «островного» эффекта), и при положи-

тельных потенциалах (эффект токораспределения). В результате коэффициент усиления становится меньше, чем $\frac{1}{D}$.

В отличие от μ , крутизна S даже при сводимости триода к эквивалентному диоду не является постоянным параметром, а зависит от режима. Подставив (16) в (26), получаем:

$$S = \left(\frac{\partial J_a}{\partial U_c} \right)_{U_a} = \frac{3}{2} P (U_c + D U_a)^{1/2}. \quad (38)$$

Если еще раз использовать (16), то

$$S = \frac{3}{2} B^{2/3} J_a^{1/3}. \quad (39)$$

Из (38) и (39) следует, что при увеличении питающих напряжений триода его крутизна растет как $J_a^{1/3}$. Зависимость S от конструкции лампы определяется множителем $\frac{3}{2} B^{2/3}$, т.е. $\frac{A}{d_{kc}^{4/3}}$ для плоской и $\frac{A^{2/3}}{r_c^{4/3} \beta^{4/3}}$ для цилиндрической систем.

Эти множители показывают, что наиболее действенный способ повышения S состоит в уменьшении расстояния сетка-катод.

Крутизна зависит от потенциала сетки значительно сильнее, чем μ . Уменьшение S при больших отрицательных U_c объясняется, очевидно, приближением к отсечке тока, а при положительных U_c – приближением катодного тока к насыщению и возрастанием сеточного тока.

На рис. 11 показана типичная зависимость μ , S и R_i от U_c .

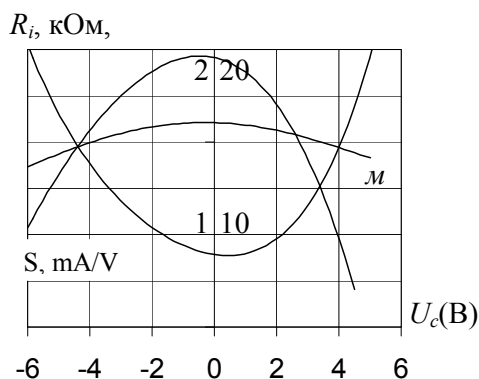


Рис. 11. Зависимость статических параметров триода от потенциала сетки.

Нетрудно из аналогичных соображений прийти к качественной зависимости μ , S и R_i от потенциала анода, на чем мы, однако, не останавливаемся.

Методика измерений характеристик и параметров триода

Обычно измеряются анодно-сеточные и анодные характеристики и статические параметры в зависимости от анодного и сеточного потенциалов.

Снятие характеристик производится путем измерения ряда значений напряжений на аноде и соответствующих им величин анодного тока с последующим построением характеристик по полученным точкам.

Располагая семейством анодных и анодно-сеточных характеристик, можно найти графическим или численным путем параметры триода по формулам (26)-(28). Если, однако, желательно непосредственно изучать зависимость параметров от различных факторов, то этот путь является неудобным, связанным с выполнением многих лишних операций, а также потерей точности. Ниже рассматривается свободный от указанных недостатков метод нахождения статических параметров, основанный на измерении переменной составляющей анодного тока.

§1. Метод переменной составляющей

А. Измерение крутизны S

Для нахождения S может быть использована схема рис. 10. Если на вход подать синусоидальное напряжение малой амплитуды, то триод можно считать работающим в линейном режиме (критерий «малости» нетрудно установить из рассмотрения характеристик лампы). В таком случае справедлива формула (36). Следовательно, измерив падение напряжения $U_{\text{вых}}$ на сопротивлении R_a и зная U_{ex} , мы получаем

$$S = \frac{\mu}{R_i} \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{ex}}} \left(\frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_a} \right) = \frac{i_a}{U_{\text{ex}}} \left(1 + \frac{R_a}{R_i} \right) \quad (40)$$

(R_a предполагается известным, и $i_a = \frac{U_{\text{вых}}}{r_a}$ находится без труда).

Величина $S_{\partial} = \frac{i_a}{U_{ex}}$ отличается от S тем, что является отношением переменных составляющих анодного тока и напряжения на сетке не в статическом режиме (при постоянном потенциале на аноде), а в динамическом режиме, когда из-за наличия в анодной цепи сопротивления R_a потенциал анода меняется.

Поэтому S_{∂} называется динамической крутизной. Измерив $U_{вых}$ и i_a , мы непосредственно можем найти S_{∂} . Согласно (40),

$$S = S_{\partial} \left(1 + \frac{R_a}{R_i} \right), \quad (41)$$

и для перехода от S_{∂} к S необходимо знать R_i , которое само является искомой величиной.

Если принять $S = S_{\partial}$, то, как следует из (41), относительная ошибка измерения S составит $\frac{R_a}{R_i}$. Казалось бы, погрешность можно сделать сколь угодно малой, уменьшив R_a . Однако, при этом соответственно падает выходное напряжение $U_{вых}$.

Указанную ошибку можно существенно уменьшить, если анодную нагрузку R_a включить в схему электронного стабилизатора напряжения таким образом, чтобы стабилизированное напряжение было приложено к аноду испытуемой лампы. Принципиальная схема такого устройства показана на рис. 12.

Основными элементами схемы являются регулирующая лампа L_1 , усилитель постоянного тока на лампе L_2 , газовый стабилизатор напряжения L_3 , служащий для придания потенциалу сетки лампы некоторого фиксированного отрицательного смещения (опорного напряжения) относительно катода, и делитель напряжения на переменном сопротивлении R_1 . Поясним кратко действие схемы. Пусть вследствие изменения анодного тока (например, увеличения) испытуемой лампы L_4 увеличилось падение напряжения на анодном сопротивлении R_a и анодное напряжение L_1 , а следовательно, уменьшилось напряжение U_{cm} и напряжение на управляющей сетке лампы L_2 . Это вызывает снижение анодного тока лампы L_2 и уменьшение падения напряжения на сопротивлении R_2 . Потенциал сетки лампы L_1 относительно ее катода повысится, т.к. R_2 вклю-

чено между сеткой и анодом \mathcal{L}_1 . В результате анодный ток \mathcal{L}_1 возрастет, а падение напряжения на \mathcal{L}_1 уменьшится, что вызовет увеличение U_{cm} .

Ввиду того, что изменения напряжений дважды усиливаются (на триодах \mathcal{L}_1 и \mathcal{L}_2), схема достаточно чувствительна к изменениям выходного напряжения. В результате изменение тока нагрузки практически не приводит к изменениям выходного напряжения стабилизатора U_{cm} .

Ввиду постоянства анодного напряжения, крутизна S может быть вычислена по формуле:

$$S = \frac{i_a}{U_{вх}} = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} \cdot \frac{1}{R_a}, \quad (42)$$

где $U_{вых}$ – падение напряжения на сопротивлении R_a , измеряемое милливольтметром mV (рис. 12), а $U_{вх}$ – напряжение на сетке \mathcal{L}_4 . Сопротивление R_a может иметь величину порядка единиц и десятков килоом без нарушения стабилизирующего действия схемы. Поэтому измерение $U_{вых}$ не представляет каких-либо трудностей.

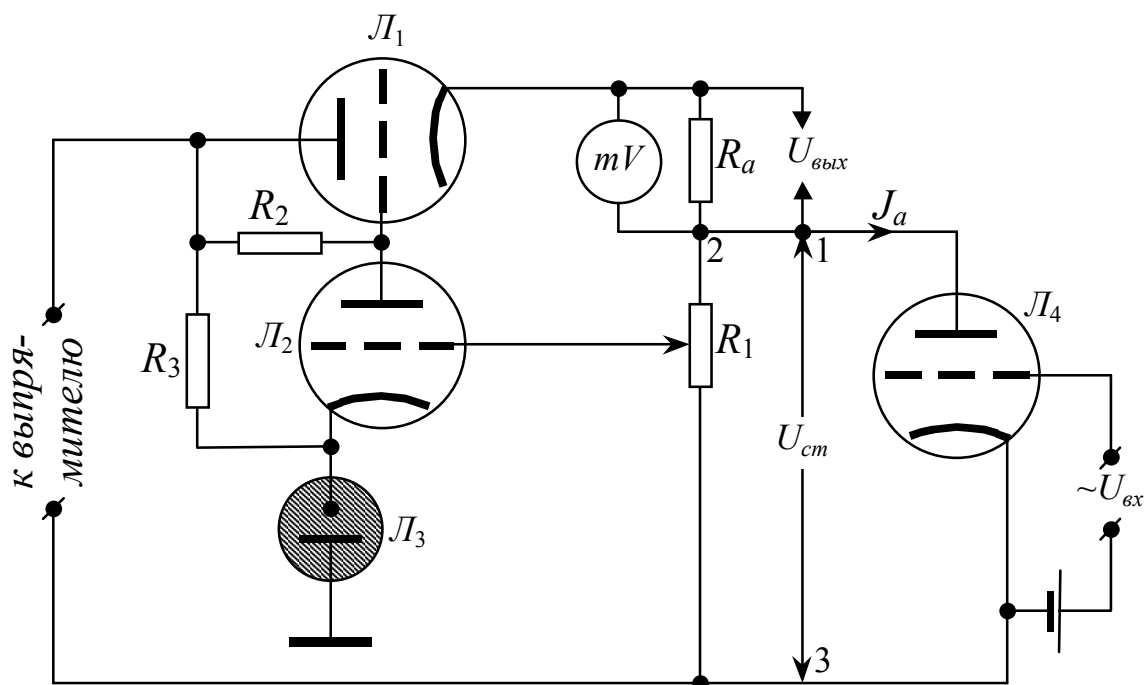


Рис. 12. Схема электронного стабилизатора напряжения.

В. Измерение внутреннего сопротивления R_i

Для измерения внутреннего сопротивления лампы методом переменной составляющей анодного тока можно применить схему, изображенную на рис. 13. В этой схеме, кроме обычных источников постоянного напряжения, в анодную цепь вводится переменное напряжение. Переменная составляющая анодного тока i_a вычисляется, как и при измерении крутизны, по падению напряжения на сопротивлении нагрузки R_a .

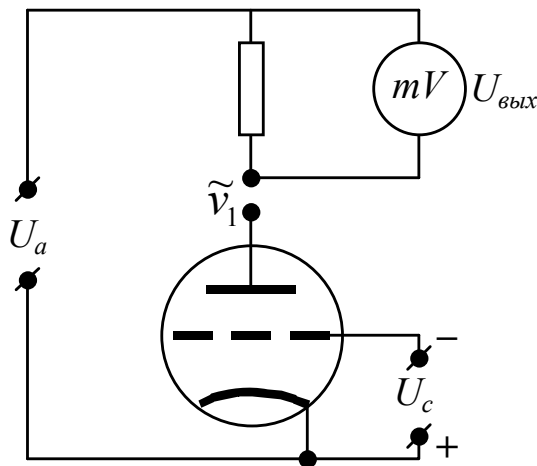


Рис. 13. Принципиальная схема измерения внутреннего сопротивления.

Установив определенные величины постоянных потенциалов сетки U_c и анода U_a и измерив переменные составляющие анодного напряжения u_a и напряжения на нагрузке $u_{вых}$, найдем, согласно (27), внутреннее сопротивление $R_i(U_c, U_a)$ по формуле:

$$R_i = \frac{u_a}{i_a} = \frac{u_a}{u_{вых}} \cdot R_a. \quad (43)$$

Как видно из рис. 13, v_1 не равно переменной составляющей анодного напряжения U_a , которое должно, таким образом, измеряться отдельно. В этом отношении известные преимущества дает включение v_1 в разрыв между точками 1 и 2 схемы рис. 12. Поскольку в этой схеме напряжение между точками 1 и 3 поддерживается постоянным, переменная составляющая анодного напряжения U_a будет равна v_1 , а следовательно,

$$R_i = \frac{v_1}{u_{вых}} \cdot R_a. \quad (44)$$

ЛИТЕРАТУРА

1. В.И.Гапонов, Электроника, ч. I, II, М, 1960, §40.
2. Жеребцов И.И. Электроника. Энергоатомиздат. М.: 1990.
3. Б.М.Царев, Расчет и конструирование электронных ламп. Энергия, 1967.
4. В.Н.Дулин. Электронные и квантовые приборы СВЧ. М. Энергия, 1972, 224 с.
5. Электроника : энцикл словарь Гл. ред. В.Г.Колесников, М. Сов. Энцикл., 1991, 688 с.

Исследование принципов статического управления электронным потоком в триоде

Составители

Ашбель Инесса Яковлевна

Мануилов Владимир Николаевич

Павельев Владимир Геннадьевич

Петелин Михаил Иванович

Подписано к печати

Формат 60×84 1/16

Печать офсетная Бумага оберточная.

Усл печ.л.

Тираж 500 экз.

Заказ

Бесплатно.

Нижегородский государственный университет им.
Н.И.Лобачевского

603600 ГСП-20, Н. Новгород, просп. Гагарина, 23.

Типография ННГУ 603600, Н. Новгород, ул. Б Покровская, 37.