

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 13

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ВАКУУМНОГО ДИОДА И КЕНОТРОННОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ

Теоретические замечания

Выпрямителем называется прибор, осуществляющий преобразование переменного тока в постоянный. Основной частью выпрямителя является элемент, в котором сила тока зависит не только от величины, но и от направления приложенного к нему напряжения. Таким условиям удовлетворяет двухэлектродная электровакуумная лампа. Диод, используемый для выпрямления переменного тока, как правило, называют кенотроном.

В реальных схемах анодная цепь диодов содержит некоторую нагрузку. Рассмотрим схему, показанную на рис. 1, предполагая, что нагрузка R_H является омической (реактивные элементы отсутствуют).

Наличие нагрузки существенно изменяет характер зависимости анодного тока I_a от напряжения V_a между анодом и катодом диода. Для контура, обтекаемого током I_a , можно записать

$$V_H = I_a R_H + V_a,$$

или

$$I_a = (V_H / R_H) - (V_a / R_H). \quad (1)$$

Поскольку $V_H / R_H = \text{const}$, последнее соотношение есть уравнение прямой в координатах I_a , V_a . Такую прямую, которую можно назвать динамической анодной характеристикой, легко построить на статической анодной характеристике диода (рис. 2). Полагая $I_a = 0$, находим отрезок, отсекаемый этой

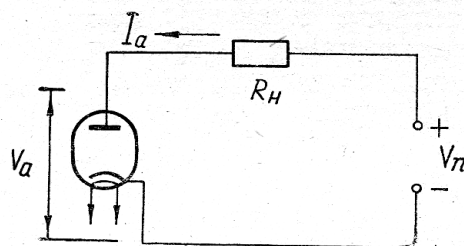


Рис. 1

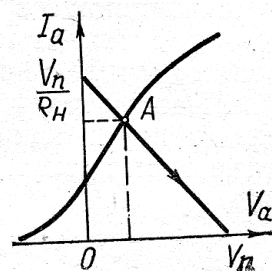


Рис. 2

прямой на оси абсцисс: он равен V_H . Отрезок, отсекаемый прямой от оси координат, определяется из (1) при $V_a = 0$ и равен V_H / R_H . Точка A пересечения динамической анодной характеристики со статической является решением уравнения (1). Проекция этой точки на ось ординат определяет значение тока I_a , протекающего в цепи диода с нагрузкой, а проекция ее на ось абсцисс определяет напряжение V_a на аноде лампы.

Если кенотрон включить в цепь переменного тока так, как показано на рис. 3, то ток через нагрузочное сопротивление пойдет только в течение тех полупериодов, когда на аноде кенотрона будет положительный потенциал.

В приведенной схеме ток через сопротивление R_H проходит только в одном направлении, но по величине является пульсирующим. Для того чтобы использовать оба полупериода переменного тока, применяют так называемое двухполупериодное выпрямление. Для этого используют диод с двумя анодами. В таком кенотроне поочередно работает то один, то другой анод. Схема такого выпрямителя показана на рис. 4. Аноды кенотрона включаются во вторичную об-

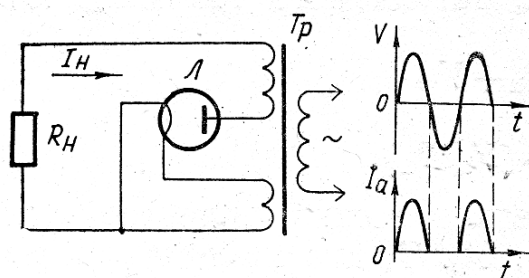


Рис. 3

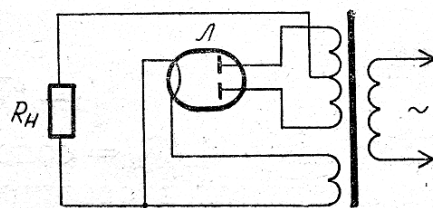


Рис. 4

мотку повышающего трансформатора так, что на одном аноде — положительный потенциал, а на другом — отрицательный относительно катода в каждый момент времени. Накал лампы питается от дополнительной обмотки того же трансформатора. Ток через кенотрон в данном случае идет в течение обоих полупериодов.

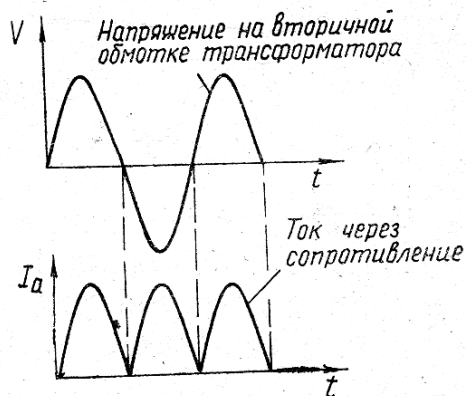


Рис. 5

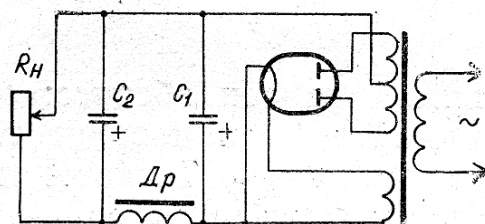


Рис. 6

Электроны попадают на тот анод, который в данный момент находится под положительным потенциалом относительно катода. Нагрузка присоединяется к средней точке вторичной обмотки трансформатора. При этом напряжение меж-

ду катодом и анодом равно половине всего напряжения, создаваемого вторичной обмоткой трансформатора. В такой схеме ток через сопротивление R_H течет все время в одном направлении, а сила тока изменяется от нуля до некоторого максимального значения (рис. 5), т. е. ток по-прежнему носит пульсирующий характер.

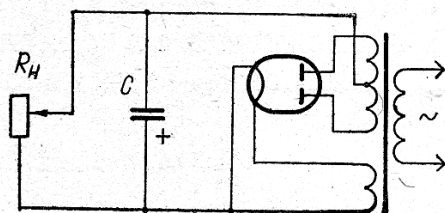


Рис. 7

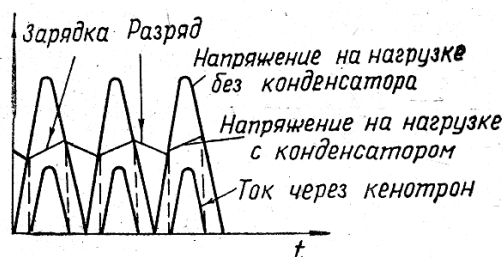


Рис. 8

Как видно, частота пульсаций тока в двухполупериодном выпрямителе в два раза больше, чем в однополупериодном выпрямителе.

Пульсирующий ток для питания многих практических цепей не пригоден, поэтому его необходимо «сгладить». Сглаживание выпрямленного тока производится с помощью фильтров, которые представляют собой различные комбинации конденсаторов и катушек индуктивности (дресселей). Одна из возможных и часто используемых схем выпрямителя показана на рис. 6.

Для того чтобы выяснить действие фильтра, рассмотрим простейший случай, когда фильтром является один конденсатор, шунтирующий нагрузку (рис. 7).

В течение того времени, когда через кенотрон течет ток, конденсатор заряжается, а остальное время конденсатор разряжается на нагрузку. Напряжение на нагрузке при наличии конденсатора имеет значительно менее пульсирующий характер, чем без конденсатора (рис. 8).

Применение дресселя и второго конденсатора, как показано на рис. 6, еще сильнее уменьшает пульсацию тока в нагрузке.

Напряжение на конденсаторе фильтра направлено навстречу напряжению трансформатора. Поэтому ток через кенотрон пойдет только тогда, когда мгновенное значение напряжения трансформатора будет больше, чем напряжение на конденсаторе, т. е. в двухполупериодном кенотронном выпрямителе с конденсатором в качестве фильтра ток че-

рез лампу идет только в течение некоторой части полупериода.

Если полагать, что напряжение на конденсаторе лишено пульсаций и равно постоянной составляющей выпрямленного напряжения V_{cp} , то процесс прохождения тока через кенотрон можно иллюстрировать графиками, изображенными на рис. 9. На этом рисунке представлены три графика: I — идеализированная анодная характеристика кенотрона, II — график напряжения на кенотроне в зависимости от времени, III — график тока, идущего через кенотрон в зависимости от времени.

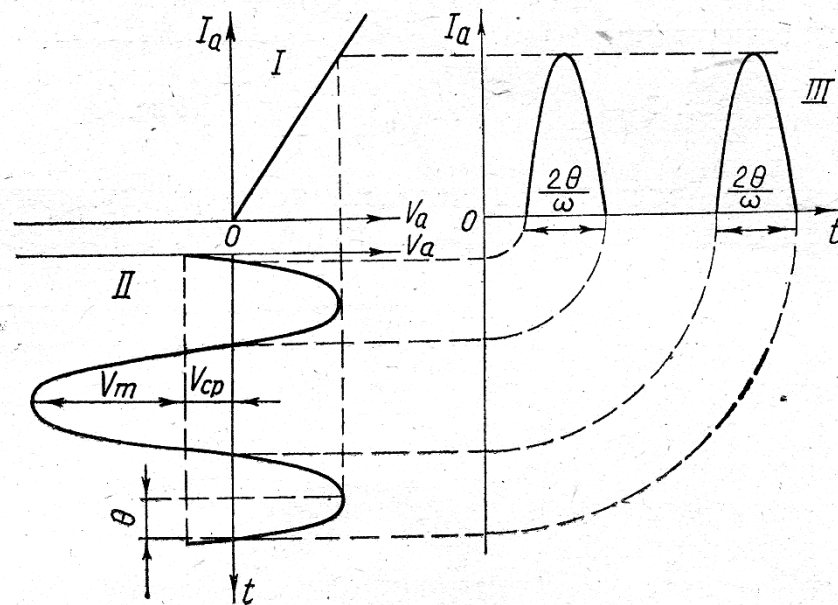


Рис. 9

График II представляет собой косинусоиду, смещенную по оси напряжений на величину напряжения V_{cp} на конденсаторе фильтра. Кривая III является производной от первых двух кривых.

Как видно из рис. 9, мгновенное значение напряжения между анодом и катодом кенотрона при наличии напряжения на конденсаторе уменьшается на величину этого напряжения, т. е. его можно записать в виде

$$V_a = V_{\max} \cos \omega t - V_{cp} = V_{\max} (\cos \omega t - V_{cp}/V_{\max}). \quad (2)$$

Отношение $V_{cp}/V_{\max}$, исходя из графика II, можно считать равным $\cos \Theta$ ($V_{cp} = V_{\max} \cos \Theta$), тогда (2) запишется как

$$V_a = V_{\max} (\cos \omega t - \cos \Theta), \quad (3)$$

где Θ — есть угол отсечки, равный половине той части полупериода в угловом измерении, в течение которой ток проходит через кенотрон.

Для прямолинейного участка характеристики кенотрона мгновенное значение тока связано с мгновенным значением напряжения следующим образом:

$$I_a = S V_a,$$

где S — крутизна анодной характеристики.

Учитывая (3), можно записать

$$I_a = S V_{\max} (\cos \omega t - \cos \Theta). \quad (4)$$

Среднее значение тока найдем по формуле

$$\begin{aligned} I_{\text{ср}} &= \frac{1}{\pi} \int_{-\Theta}^{\Theta} I_a d(\omega t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\Theta} I_a d(\omega t) = \\ &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\Theta} S V_{\max} (\cos \omega t - \cos \Theta) d(\omega t) = \\ &= \frac{2}{\pi} S V_{\max} (\sin \Theta - \Theta \cos \Theta). \end{aligned}$$

Учитывая, что $V_{\max} = V_{\text{ср}} / \cos \Theta$, можно найти зависимость угла отсечки от $V_{\text{ср}}$, $I_{\text{ср}}$ и S , т. е. от величин, которые могут быть непосредственно определены при измерениях:

$$\frac{I_{\text{ср}}}{V_{\text{ср}}} = \frac{2S}{\pi} \cdot \frac{\sin \Theta - \Theta \cos \Theta}{\cos \Theta} = \frac{2S}{\pi} (\tg \Theta - \Theta). \quad (5)$$

Средний ток измеряется миллиамперметром выпрямителя, а среднее напряжение на конденсаторе — высокоомным вольтметром постоянного тока. Крутизна S находится по вольт-амперной характеристике кенотрона.

Экспериментальная часть

В работе проводится экспериментальное исследование характеристик двуханодного кенотрона 5Ц4С и выпрямительных схем, содержащих этот кенотрон. Исследуется вольт-амперная характеристика одного из диодов. При изучении выпрямительных схем снимается нагрузочная характеристика, определяется угол отсечки анодного тока и проводится осциллографическое наблюдение формы входных и выходных напряжений. Все измерения осуществляются на ус-

тановке, принципиальная схема которой изображена на рис. 10.

Схема состоит из кенотрона $\mathcal{L}$, напряжение на который подается от трансформатора Tr ; сглаживающего фильтра, со-

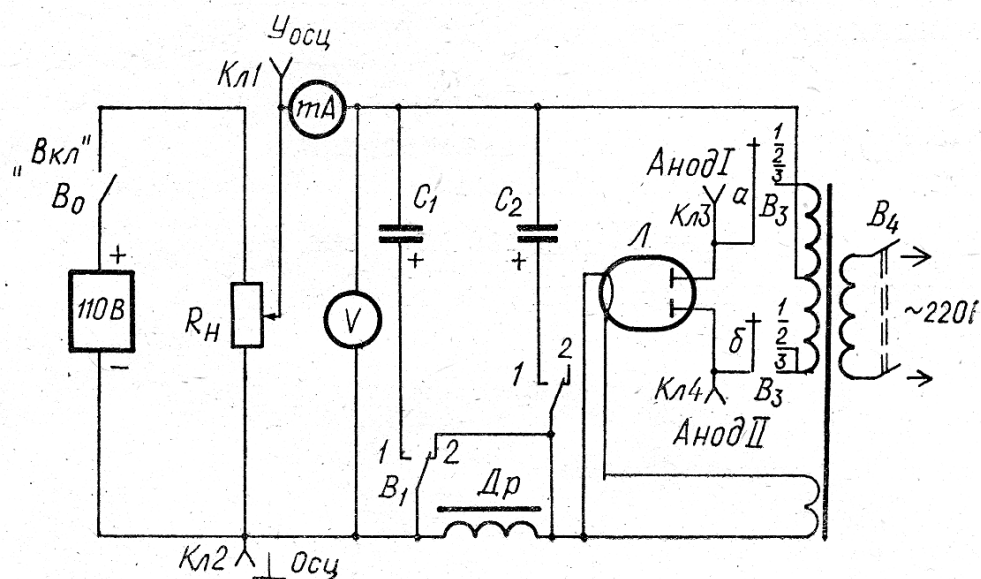


Рис. 10

державшего емкости C_1 , C_2 и индуктивность (дроссель) Dr ; переменного сопротивления R_H и измерительных приборов (вольтметра и миллиамперметра). В схеме имеется источник постоянного напряжения, используемый при снятии вольт-амперной характеристики. Нужный вариант схемы составляется с помощью переключателей B_0 , B_1 , B_2 , B_3 и B_4 .

Включение установки производить только в том порядке, который указан в каждом упражнении. Запрещается пропускать через лампу ток более 100 мА (большой ток может привести к разрушению катода). Не разрешается вынимать лампу из гнезда.

Упражнение 1. Исследование статической анодной характеристики кенотрона

Исследуется кенотрон 5Ц4С, состоящий из двух диодов, объединенных в одном вакуумном баллоне. Анодная характеристика снимается только для одного диода. Второй диод имеет аналогичную анодную характеристику.

Установить переключатели схемы (рис. 10) в следующие положения: B_1 —2; B_2 —2; B_3 —1; B_0 —«Вкл».

При этом, если устранить все отключенные элементы, схема будет выглядеть так, как показано на рис. 11.

Ручку потенциометра R_H вывести против часовой стрелки до упора. Миллиамперметр включить на предел «100 мА». Включить вилку «220В» в соответствующую розетку. Поставить переключатель B_4 в положение «сеть» и подождать 2—

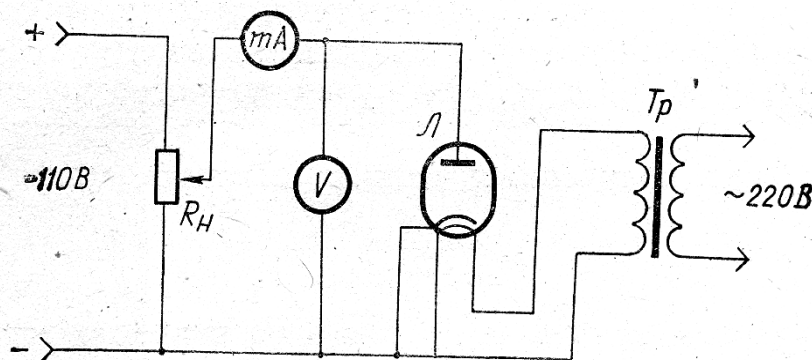


Рис. 11

3 минуты, необходимые для прогрева лампы. Миллиамперметр покажет наличие тока в цепи. Оценить величину этого тока и объяснить его происхождение.

Изменяя с помощью потенциометра R_H анодное напряжение, снять анодную характеристику диода. Измерения проводить до значений анодного тока в 100 мА, не более.

Результаты измерений оформить в виде таблицы. После окончания измерений следует вывести потенциометр R_H , отключить с помощью переключателя B_0 постоянное напряжение, а затем с помощью переключателя B_4 и соответствующей вилки отключить переменное напряжение.

Построить на «миллиметровке» статическую анодную характеристику диода. Для линейного участка по формуле

$$S = (\Delta I_a) / (\Delta V_c)$$

найти крутизну анодной характеристики.

Упражнение 2. Исследование зависимости напряжения на выходе выпрямителя от силы выпрямленного тока

Ввести потенциометр R_H по часовой стрелке до упора. Поставить переключатели рабочей установки (рис. 10) в следующие положения: B_1 — 1; B_2 — 1; B_3 — 3; B_0 — «Выкл».

При этом реализуется схема двухполупериодного выпрямителя с фильтром, показанная на рис. 6. Включить в сеть вилку «220В». Переключатель B_4 поставить в положение «сеть». Для прогрева лампы подождать 2—3 минуты.

Меняя сопротивление нагрузки R_H , снять и оформить в виде таблицы показания миллиамперметра и вольтметра. При выполнении упражнения следует устанавливать миллиамперметр на пределы, при которых измерение тока будет проводиться с наибольшей точностью. После измерений ввести нагрузку R_H (повернуть ручку по часовой стрелке до упора).

На основе полученных данных строится график зависимости

$$V_{\text{вых}} = f(I_{\text{вых}}).$$

С уменьшением величины R_H ток в нагрузке возрастает. Падение напряжения на выходе выпрямителя при увеличении тока в нагрузке связано с увеличением напряжения на кенотроне и на дросселе фильтра. Из полученного графика находят величину

$$R = (\Delta V_{\text{вых}}) / (\Delta I_{\text{вых}}),$$

равную сопротивлению выпрямителя. Эту величину следует находить для линейной части графика, соответствующей нормальным нагрузкам выпрямителя.

Провести аналогичные измерения для случая, когда фильтром служит только конденсатор C_2 . Для отключения конденсатора C_1 и дросселя Dr переключатель B_1 поставить в положение 2. Остальные переключатели должны оставаться в прежнем положении: $B_2—1$, $B_3—3$, $B_4—\text{«сеть»}$. При этом принципиальная схема выпрямителя принимает вид, показанный на рис. 7.

Постепенно уменьшая величину R_H , экспериментально определить зависимость $V_{\text{вых}} = f(I_{\text{вых}})$ для этого случая. Построить график этой зависимости и найти величину

$$R = (\Delta V_{\text{вых}}) / (\Delta I_{\text{вых}}).$$

Могут быть (по указанию преподавателя) проведены аналогичные измерения и расчеты для случаев, когда фильтром в выпрямителе служат только конденсатор C_1 и дроссель ($B_1—1$; $B_2—2$) или когда фильтр отсутствует ($B_1—2$; $B_2—2$).

Выключение установки производится с помощью переключателя B_4 и вилки «220 В».

Упражнение 3. Определение угла отсечки выпрямителя

Рассчитать угол отсечки Θ для случая, когда фильтром в выпрямителе служит только конденсатор C_2 (см. рис. 7). Расчет проводится по формуле

$$\frac{h_{\text{вых}}}{V_{\text{вых}}} = \frac{2S}{\pi} (\text{tg } \Theta - \Theta).$$

Величины $I_{\text{вых}}$ и $V_{\text{вых}}$ берутся из данных, полученных при выполнении упражнения 2, а величина крутизны S статической анодной характеристики — из данных упражнения 1. Из приведенной формулы вычисляется $\text{tg } \Theta - \Theta$, а затем находится угол отсечки Θ .

Расчет величины Θ провести при различных значениях тока $I_{\text{вых}}$, результаты оформить в виде таблицы. Построить график зависимости $\Theta = f(I_{\text{вых}})$. Дать физическое толкование полученным результатам.

Аналогичные расчеты угла отсечки провести (по указанию преподавателя) для случая, когда фильтром в выпрямителе служат конденсаторы C_1 , C_2 и дроссель, т. е. когда принципиальная схема выпрямителя выглядит так, как показано на рис. 6.

Упражнение 4. Исследование работы кенотронного выпрямителя с помощью осциллографа

Осциллограф позволяет провести наглядное исследование работы выпрямителя и выяснить роль отдельных элементов сглаживающего фильтра.

На рабочей установке (рис. 10) ручку потенциометра R_n поставить в среднее положение, миллиамперметр включить на предел 100 мА. Клемму K_1 2 на установке соединить с клеммой «Земля» на осциллографе. К клемме Y на осциллографе присоединить гибкий проводник со штекером на конце. Включить в сеть « ~ 220 В» осциллограф и рабочую установку. С работой осциллографа и его ручками управления можно ознакомиться по описанию к лабораторной работе № 17. Переключатель B_4 на установке поставить в положение «сеть».

Меняя принципиальную схему выпрямителя с помощью переключателей B_1 , B_2 , B_3 , провести наблюдение на экране электронно-лучевой трубки осциллографа развертки во времени напряжений на гнездах-клеммах K_1 1, K_1 3 и K_1 4,

вставляя штекер в эти гнезда. Эпюры всех получаемых изображений зарисовать и объяснить.

Однополупериодный выпрямитель. Переключатели установки поставить в положения B_1-2 ; B_2-2 ; B_3-2 . Получаемый при этом вариант соответствует схеме, приведенной на рис. 3. Штекер последовательно вставить в гнездо $Kл 1$, $Kл 3$ и $Kл 4$. Напряжение на гнездах $Kл 3$ и $Kл 4$ равно напряжению соответственно на первом и втором анодах кенотрона.

Двухполупериодный выпрямитель без фильтра. Переключатели установки поставить в положения B_1-2 ; B_2-2 ; B_3-3 . Этому варианту соответствует схема, приведенная на рис. 4. Штекер последовательно вставить в гнезда $Kл 1$, $Kл 3$ и $Kл 4$.

Двухполупериодный выпрямитель со сглаживающим фильтром, состоящим из одного конденсатора. Установить переключатели в положения B_1-2 ; B_2-1 ; B_3-3 . Полученный вариант соответствует схеме, приведенной на рис. 7. Штекер вставить в гнездо $Kл 1$.

Двухполупериодный выпрямитель с Г-образным фильтром. Переключатели рабочей установки поставить в положение B_1-1 , B_2-2 , B_3-3 . В этом случае фильтром служат конденсатор C_1 и дроссель. Конденсатор C_2 отключен. Штекер вставить в гнездо $Kл 1$.

Двухполупериодный выпрямитель с П-образным фильтром. Переключатели установить в положения B_1-1 , B_2-1 , B_3-3 . Этот вариант соответствует схеме выпрямителя, приведенной на рис. 6. Клемму Y осциллографа соединить с клеммой $Kл 1$ рабочей установки.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ

1. В чем состоит явление термоэмиссии? Формула Ричардсона.
2. «Закон трех вторых».
3. Анодная характеристика диода. В чем состоит основное отличие статической анодной характеристики диода от зависимости, описываемой «законом трех вторых»?
4. Основные параметры диода.
5. Динамическая анодная характеристика диода.
6. Одно- и двухполупериодные кенотронные выпрямители. Назначение и принцип работы сглаживающих фильтров.
7. Понятие угла отсечки и способ его вычисления.
8. Порядок выполнения работы.

Литература

- Сивухин Д. В. Общий курс физики. М., 1977, т. 3, § 101, 102.
Власов В. Ф. Электронные и ионные приборы. М., 1960, § 8.1, 8.2, 8.5—9.1, 10.1—10.6.