

В. Т. Фролкин

ИМПУЛЬСНАЯ ТЕХНИКА

«СОВЕТСКОЕ РАДИО»

В. Т. ФРОЛКИН

ИМПУЛЬСНАЯ ТЕХНИКА

*Допущено Главным Управлением политехнических
и машиностроительных вузов в качестве учебного пособия
для радиотехнических факультетов высших учебных заведений*

Под редакцией В. Н. Дулина

ИЗДАТЕЛЬСТВО «СОВЕТСКОЕ РАДИО»

МОСКВА 1960

Настоящая книга предназначается в качестве учебного пособия для студентов радиотехнических факультетов высших учебных заведений по курсу «Импульсная техника». Она написана в соответствии с одноименной программой, утвержденной Министерством высшего образования СССР 21 июня 1956 г. Некоторые отступления от программы объясняются, в основном, необходимостью сокращения менее существенных разделов курса в связи с ограниченным объемом книги, установленным МВО, а также необходимостью введения нового материала по импульсным схемам с использованием полупроводниковых приборов.

Курс «Импульсная техника» базируется на материале предшествующих курсов: теоретических основ электротехники и теоретических основ радиотехники, а также курса высшей математики в обычном объеме, установленном для технических вузов.

Автор надеется, что книга окажется также полезной для инженеров, занимающихся проектированием и разработкой импульсных схем в различных областях применения радиотехники и промышленной электроники.

Виктор Тихонович Фролкин

ИМПУЛЬСНАЯ ТЕХНИКА

Редактор *Н. Д. Исанушко.*

Техн. редактор *Б. В. Смуров.*

Обложка художника *В. В. Волкова.*

Сдан в набор 5 VI. 1959, Подп. к печати 9.I. 1960 г. Формат 84×108/32

Объем 18,45 п. л.

Уч.-изд. л. 17,747

Г 60014.

Цена в перепл. № 5 10 р. 40 к.

Заказ 619.

Типография № 6 УПП Ленсовнархоза, Ленинград, ул. Моисеенко, 10.

ГЛАВА I

ВВЕДЕНИЕ

1. 1. ПРЕДМЕТ ИМПУЛЬСНОЙ ТЕХНИКИ

Развитие таких областей радиотехники, как телевидение, радиолокация и радиоуправление, где рабочие сигналы, токи или напряжения носят характер импульсов разнообразной формы и длительности, повторяющихся через определенные интервалы времени, потребовало создания устройств для формирования импульсных колебаний заданной формы.

Другим источником, вызывающим непрерывное расширение и углубление круга вопросов, связанных с формированием и индикацией импульсов напряжения или тока, является прикладная электроника — применение электрических сигналов для автоматизации и контроля промышленных процессов, для измерений различного рода неэлектрических величин, включая устройства для точного измерения интервалов времени, счетчики элементарных частиц в ядерной физике и индикаторы «меченых атомов», а также устройства для осуществления математических операций в цифровых вычислительных машинах.

Предметом импульсной техники является изучение методов и средств получения и индикации импульсных сигналов различной формы, применяющихся в радиотехнике и прикладной электронике, а также проектирование и расчет элементов импульсных систем.

Сигналы, формируемые в схемах и устройствах, рассматриваемых в курсе импульсной техники, обычно имеют низкую среднюю мощность, не превышающую мощности рассеяния приемно-усилительных ламп и полупроводниковых приборов. Амплитудные значения токов и напряжений также сравнительно невелики*.

* Следует отметить, что при работе обычных приемно-усилительных ламп в импульсном режиме с большой скважностью импульсные токи могут в сотни и тысячи раз превышать средние значения.

Длительность и период повторения импульсных сигналов могут быть самой различной величины, начиная от единиц и десятых долей микросекунды до единиц и десятков секунд. Скважность сигналов, т. е. отношение периода повторения к длительности импульса, может меняться от значения, близкого к единице, до нескольких сотен и тысяч единиц.

Особенности работы и изучения импульсных устройств. При проектировании импульсных устройств приходится оперировать обычно с напряжениями и токами самой разнообразной формы (треугольной, прямоугольной, ступенчатой, экспоненциальной, гиперболической и др.). Импульсные сигналы в отличие от синусоидальных претерпевают существенные изменения формы даже при прохождении через линейные цепи. Это свойство лежит в основе методов создания импульсных сигналов необходимой формы с помощью линейных электрических цепей, иногда объединяемых термином «метод линейного формирования сигналов».

При линейном формировании импульсных сигналов широко используются усилительные схемы с отрицательной обратной связью, применение которой позволяет стабилизировать форму сигналов и осуществить согласование входного и выходного сопротивлений усилителя с внешними цепями. Часто назначение усилителя в импульсных устройствах заключается не в увеличении амплитуды колебаний, а в понижении внутреннего сопротивления источника сигнала.

Другой метод формирования колебаний, применяемый в импульсной технике, заключается в использовании нелинейности участков характеристик ламп и полупроводниковых приборов (метод нелинейного формирования сигналов). Электронные и ионные приборы в этом случае используются в качестве электронных реле, имеющих два положения: «включено» (лампа проводит ток) и «выключено» (лампа заперта).

В импульсных устройствах, в отличие от ряда схем радиоприемной и радиопередающей аппаратуры, необходимые сигналы получаются обычно не при стационарных, а при переходных процессах, таких, как изменение заряда конденсатора или тока в катушке самоиндукции.

В связи с этими особенностями в импульсной технике математический анализ рабочих процессов с помощью рядов и интегралов Фурье применяется сравнительно редко. Основным математическим аппаратом при исследовании импульс-

ных схем является аппарат составления и решения линейных интегро-дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами. При этом методе характеристики нелинейных элементов представляются отдельными линейными участками, а дифференциальные уравнения, соответствующие отдельным участкам, «сшиваются» на их границах.

Если электрическая цепь не сложна и форма выходного сигнала проста, то решение дифференциального уравнения можно искать «классическим способом» в форме суммы частного и общего решений. Однако в настоящее время при исследовании различных импульсных схем широко применяется операторный метод с использованием прямого и обратного преобразования Лапласа $L[f(t)]$

$$L[f(t)] = \varphi(p) = \int_0^{\infty} f(t) \exp[-pt] dt,$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{c-j\infty}^{c+j\infty} \varphi(p) \exp[pt] dp,$$

где второй интеграл, определяющий обратное преобразование, вычисляется в плоскости комплексного переменного оператора p .

Удобство и эффективность этого метода решения дифференциальных уравнений особенно важны при анализе сложных схем, описываемых системами дифференциальных уравнений.

В ряде импульсных устройств часто возникает задача определения времени установления режима динамического равновесия, а также условий существования этого режима при изменении заряда конденсатора, когда заряд этого элемента происходит по одной цепи в течение длительности каждого из членов импульсной последовательности, а разряд — по другой цепи в промежутках между импульсами.

В этом случае время установления режима динамического равновесия и условия его существования будут функцией числа n поступивших импульсов. Это число является целочисленным аргументом с конечными приращениями.

Такие задачи удобно решать с использованием линейных разностных уравнений (уравнений в конечных разностях)

и с применением дискретного преобразования Лапласа (см., например, [6])

$$\varphi(q) = \sum_{n=0}^{\infty} f[n] \exp[-qn],$$

$$f[n] = \frac{1}{2\pi j} \int_{c-j\infty}^{c+j\infty} \varphi(q) \exp[qn] dq.$$

Эти формулы устанавливают связь между ступенчатой функцией вещественного переменного n (оригиналом) и функцией комплексного переменного q (изображением). Ряд, определяемый первой формулой, абсолютно сходится при значениях действительной части переменного q , превышающих величину σ_0 — абсциссу сходимости. Таким образом, если для данной ступенчатой функции $f[n]$ абсцисса сходимости $\sigma_0 < \infty$, то ряд будет сходиться при всех значениях q , для которых $R_e[q] > \sigma_0$.

Можно определить однозначность прямого и обратного дискретного преобразования Лапласа и получить ряд правил и теорем, аналогичных соответствующим правилам и теоремам обычных преобразований Лапласа. Преимущества применения дискретного преобразования Лапласа при решении линейных разностных уравнений такие же, как и в случае использования обычного преобразования Лапласа для решения дифференциальных уравнений.

Применяя дискретное преобразование Лапласа к линейному разностному уравнению (или системе уравнений) с постоянными коэффициентами, можно получить алгебраическое уравнение (или систему уравнений) относительно изображения искомой ступенчатой функции, содержащее все граничные условия. По полученному изображению, используя таблицы или правила обратного перехода для дискретного преобразования Лапласа, можно найти оригинал.

Возникновение и развитие импульсной техники. Импульсная техника является одной из самых молодых отраслей радиотехники и электроники. Однако большие достижения в этой области являются результатом работы и открытий ученых и инженеров на протяжении десятков лет задолго до появления радиолокации, телевидения и радиоуправления.

Наиболее характерным для импульсной техники является использование генераторов релаксационных (разрывных) колебаний и, в первую очередь, генераторов треугольных и прямоугольных импульсов. В 1918 г. круп-

нейшим русским радиотехником, руководителем Нижегородской радиотехнической лаборатории, профессором М. А. Бонч-Бруевичем была исследована схема двухкаскадного реостатного усилителя с положительной обратной связью, лежащая в основе разработанных впоследствии спусковых схем. В 1918—1919 гг. за границей были опубликованы схемы самовозбуждающегося мультивибратора (Абрагам и Блох) и спусковой схемы (триггера) с анодно-сеточными связями (Икклз и Джордан). К 1925—1930 гг. относится начало разработок релаксационных транзитронных генераторов (Ван дер Поли), принцип которых в настоящее время используется в фантастропах, а также схем линеаризации напряжения для развертки луча электронно-лучевых трубок (схема Паккла, применяющаяся в осциллографах и в настоящее время).

Ведущее место в развитии общей теории генераторов несинусоидальных колебаний принадлежит советской школе, созданной академиками Л. И. Мандельштамом и Н. Д. Папалекси. Представителями этой школы академиком А. А. Андроновым и профессором С. Э. Хайкиным была разработана теория релаксационных колебаний, обеспечившая в дальнейшем решение многих вопросов теории и задач проектирования различных спусковых и релаксационных устройств.

Создание и бурное развитие современной импульсной техники относится к годам второй мировой войны и послевоенным годам в связи с внедрением радиоэлектроники в экспериментальную физику, промышленность и военную технику. За годы войны научными и инженерно-техническими работниками воюющих стран было создано множество импульсных схем и устройств. Результаты разработок в области радиоэлектроники, проводившихся в США и Англии, нашли отражение в серии книг, выпущенных Массачусетским технологическим институтом в США, ряд книг которой содержит большое количество схем и устройств импульсной техники*.

Таким образом, в послевоенные годы был создан громадный практический «задел», опередивший научное обобщение достигнутых результатов. Это в значительной степени тормозило дальнейшее развитие импульсной техники.

Глубокие научные исследования, проведенные за послевоенное десятилетие как за рубежом, так и, в особенности, в нашей стране, позволили ликвидировать этот пробел

* В русском переводе названия этих книг приведены в списке литературы (см. [3, 5, 8, 9]).

и обеспечить новые крупнейшие достижения в области импульсной техники.

Большой вклад в развитие теоретических основ импульсной техники внесли Ю. Б. Кобзарев, С. И. Евтянов, В. И. Сифоров, Н. Н. Крылов, а также Я. С. Ицхоки, С. А. Дробов, Л. А. Меерович, С. И. Катаев и многие другие.

В настоящее время импульсная техника развивается в нескольких направлениях. В связи со все расширяющимся кругом применений радиоэлектроники в физике, промышленности и военной технике решающее значение приобретают проблемы обеспечения эксплуатационной надежности и высокой экономичности импульсных схем при массовом их изготовлении и применении. Одно из средств достижения этих целей заключается в применении полупроводниковых приборов — германиевых и кремниевых диодов и триодов, обладающих по сравнению с электронными лампами большим сроком службы, малыми весами и габаритами, высокой экономичностью. В то же время полупроводниковые триоды пока еще обладают рядом недостатков, не позволяющих полностью заменить ими электронные лампы.

К числу таких недостатков следует отнести нестабильность параметров при климатических изменениях и ионизационном облучении, ограниченную скорость диффузии носителей зарядов, низкое входное сопротивление и ряд других. Отличие параметров полупроводниковых приборов (низкое входное сопротивление, наличие внутренней обратной связи и др.) от соответствующих параметров электронных ламп не позволяет использовать ранее разработанные ламповые схемы для устройств на полупроводниковых приборах.

В связи с этим при разработке импульсных схем на полупроводниковых приборах возникает ряд сложных задач, над решением которых работают многочисленные коллективы физиков и инженеров. В настоящее время уже разработаны отдельные схемы и устройства импульсной техники, использующие полупроводниковые триоды (транзисторы). Некоторые из этих схем рассмотрены в настоящей книге.

В самые последние годы началось развитие техники получения импульсов длительностью порядка единиц, десятков и сотен миллимикросекунд (10^{-9} — 10^{-7} сек) — миллимикросекундная техника. Граничные частоты спектра этих импульсов имеют порядок соответственно 1000—100 Мгц. Специфика импульсных устройств этого диапазона заключается в том, что они являются промежуточным звеном между

устройствами формирования видеоимпульсов микросекундного диапазона и генераторами и линиями передачи радиоимпульсов диапазона сверхвысоких частот. В связи с этим в технике создания миллимикросекундных импульсов, с одной стороны, стремятся улучшить обычные импульсные схемы, приблизив их к необходимым пределам, а с другой, — использовать устройства с распределенными параметрами, характерные для диапазона СВЧ. Эта область импульсной техники является предметом специального изучения.

1. 2. ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ СХЕМЫ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ЛАМП И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Для математического анализа процессов в импульсных схемах необходимо аналитическое выражение вольтамперных характеристик электронных и ионных приборов. Характеристики этих приборов нелинейны и, в зависимости от требуемой степени совпадения рабочего участка реальных характеристик с его аналитическим выражением, могут быть аппроксимированы различными функциями. В качестве нелинейной аппроксимации наиболее часто используется представление характеристик ламп в виде экспоненты, степенного полинома, полукубической параболы, а также некоторых гиперболических функций.

Однако подобные нелинейные аппроксимации пригодны лишь для решения отдельных специфических проблем исследовательского характера и для обычных инженерных расчетов не находят широкого применения.

В настоящее время для инженерных расчетов, как правило, используется линейная аппроксимация характеристик электронных ламп и полупроводниковых приборов, позволяющая применить для исследования эквивалентных схем импульсных устройств линейные дифференциальные или разностные уравнения с постоянными коэффициентами. Точность линейной аппроксимации, в особенности вблизи нижнего и верхнего загибов характеристики, естественно, ниже, чем в случае нелинейной аппроксимации. Однако очень часто при анализе импульсных схем наиболее важным представляется получение приближенных, но наглядных формул, определяющих общие соотношения между параметрами схемы, в то время как количественные уточнения более просто могут быть получены в процессе экспериментирования. В других случаях, когда нелинейность характеристики лампы определяет сущность физических процессов, как это имеет место, например, в блокинг-генераторе, более целе-

сообразным оказывается применение графоаналитических методов анализа с использованием графического построения характеристик ламп и нагрузочных цепей.

Следует отметить, что в целом ряде случаев усложнение анализа для уточнения полученных «линеаризованных» формул оказывается нецелесообразным вследствие значительного разброса характеристик от экземпляра к экземпляру и изменения параметров приборов при старении и воздействии климатических факторов.

Эквивалентные линейные схемы диода и триода.

На рис. 1.1 представлены линеаризованные вольтамперные характеристики диода (рис. 1.1, а) и триода (рис. 1.1, б).

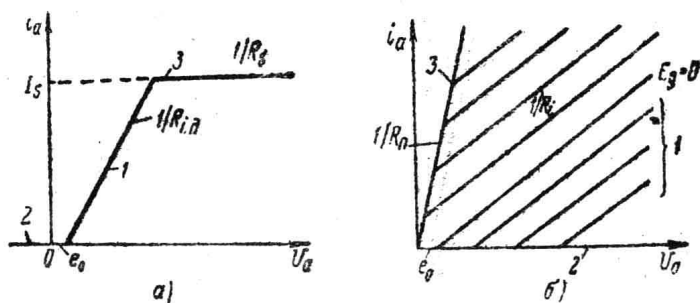


Рис. 1.1. Линеаризованные статические характеристики диода (а) и триода (б):

1 — режим усиления; 2 — режим отсечки; 3 — критический режим.

Отдельные участки этих характеристик можно представить следующими аналитическими выражениями:

Участок 1 — режим усиления для триода и режим передачи для диода

$$i_a = \frac{1}{R_{i\bar{a}}} [\mu U_g + U_a - e_0] \quad (\text{триод}). \quad (1.1a)$$

$$i_a = \frac{1}{R_{i\bar{a}}} [U_a - e_0] \quad (\text{диод}). \quad (1.16)$$

Участок 2 — режим отсечки (запирания) лампы

$$i_a = 0. \quad (1.2)$$

Участок 3 — критический режим для триода и режим насыщения для диода

$$i_a = \frac{U_a}{R_n} \quad (\text{триод}), \quad (1.3a)$$

$$i_a = I_s + \frac{U_a}{R_s} \quad (\text{диод}). \quad (1.36)$$

Обозначения величин, использованные в формулах (1.1) — (1.3), поясняются рис. 1.1. В частности, параметр e_0

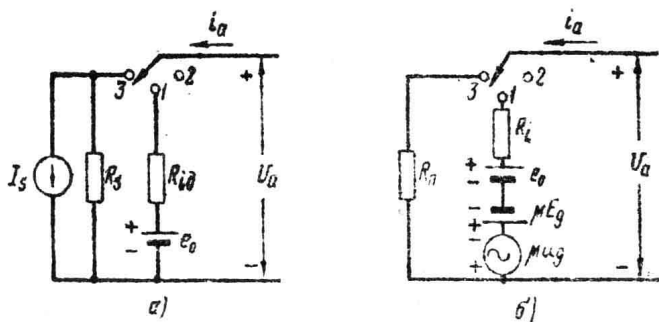


Рис. 1. 2. Эквивалентные схемы диода (а) и триода (б), соответствующие характеристикам рис. 1. 1.

характеризует величину отрезка на оси напряжений, отсекаемого линеаризованной характеристикой в режиме передачи для диода и в режиме усиления для триода при нулевом сеточном смещении ($E_g = 0$). Следует подчеркнуть также, что при такой аппроксимации участков ламповых характеристик величины напряжений и токов электродов лампы включают как переменные ($i(t)$, $u(t)$), так и постоянные составляющие (I , E). Так, например, величина напряжения на сетке U_g в формуле (1. 1a) может включать как переменное напряжение сигнала $u_g(t)$, так и постоянное напряжение смещения E_g : $U_g = u_g(t) + E_g$.

В соответствии с соотношениями (1. 1), (1. 2) и (1. 3) на рис. 1. 2 представлены эквивалентные схемы диода и триода, которые в дальнейшем используются для получения расчетных соотношений.

Положение переключателя в этих схемах должно соответствовать режиму работы диода или триода.

Так, например, ключ в положении 2 на схеме рис. 1. 2, а должен находиться в течение тех интервалов времени, когда напряжение между анодом и катодом $U_a < e_0$. Для схемы

рис. 1. 2, б положение 2 ключа определяется областью значений $U_a < 0$ и $U_g < -E_{g_0}$, где через E_{g_0} обозначена величина напряжения запирания лампы по сетке.

Пентод с постоянным напряжением E_{g_2} между экранирующей сеткой и катодом. Линеаризованные характеристики пентода для некоторого напряжения E_{g_2} между экранирующей сеткой и катодом представлены на рис. 1. 3, а.

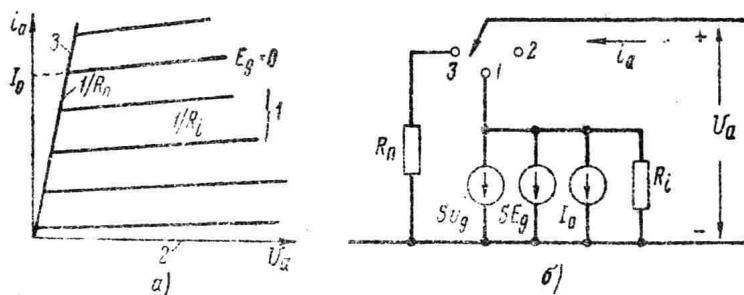


Рис. 1. 3. Линеаризованные статические характеристики пентода (а) и эквивалентная схема (б).

Очевидно, что соотношения (1. 1а), (1. 2) и (1. 3а), а следовательно, и эквивалентная схема рис. 1. 2, б будут справедливы и в этом случае, если под величиной e_0 , как и ранее, понимать отрезок на оси абсцисс, отсекаемый продолжением спрямленной характеристики для $E_g = 0$. (Из рис. 1. 3, а следует, что для пентодов всегда $e_0 < 0$.) Для пентода, работающего в режиме усиления, иногда более удобно оперировать эквивалентной схемой с использованием генераторов тока (см. рис. 1. 3, б) в соответствии с соотношением

$$i_a = I_0 + SU_g + \frac{U_a}{R_i}, \quad (1. 4)$$

где I_0 — условный ток, получаемый при пересечении спрямленной характеристики для $E_g = 0$ с осью токов.

Пентод с переменным напряжением U_{g_2} . В импульсных схемах часто приходится иметь дело с пентодом, напряжение на экранирующей сетке которого изменяется относительно напряжения на катоде в процессе формирования сигнала. Это имеет место, например, в тех случаях, когда экрани-

рующая сетка питается от источника E_{g_2} через омический делитель или же при наличии катодного сопротивления и незашунтированной на катод цепи экранирующей сетки. При переменном потенциале экранирующей сетки для усилительного режима работы лампы могут быть использованы эквивалентные схемы цепей анода и экранирующей сетки (рис. 1. 4), построенные в соответствии с уравнениями линеаризованных характеристик анодного тока и тока экранирующей сетки

$$i_a = \frac{1}{R_i} (\mu U_g + \mu_{a3} U_{g_2} + U_a - e'_0), \quad (1.5a)$$

$$i_{g_2} = \frac{1}{R_{i3}} \left(\mu_{3g} U_g + \frac{1}{\mu_{a3}} U_a + U_{g_2} - e'_{03} \right), \quad (1.56)$$

где

$$R_{i3} = \frac{\partial u_{g_2}}{\partial i_{g_2}}; \quad \mu_{3g} = \frac{\partial u_{g_2}}{\partial u_g}; \quad \mu_{a3} = \frac{\partial u_a}{\partial u_{g_2}}; \quad e'_0 = I'_0 R_i;$$

$$e'_{03} = I'_{03} R_{i3}.$$

Условные токи I'_0 и I'_{03} образуются при пересечении оси ординат линеаризованными характеристиками соответственно анодного и экранного токов при $U_g = U_{g_2} = U_a = 0$.

Совместное решение двух систем уравнений, связанных с эквивалентными схемами цепей анода и экранирующей сетки, позволяет определить искомые токи и напряжения.

Для упомянутого выше случая включения в цепи экранирующей сетки и катода омических сопротивлений R_g и R_k (рис. 1. 5, а) токи и напряжения в цепи анода можно определить более просто, построив эквивалентную схему анодной цепи с эквивалентными параметрами лампы R'_i , μ' и S' (рис. 1. 5, б).

Эквивалентные параметры можно определить из решения (относительно анодного тока) следующей системы

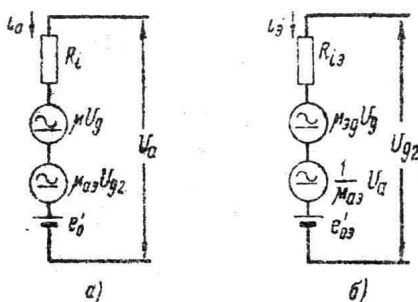


Рис. 1. 4. Эквивалентные схемы цепей анода (а) и экранирующей сетки (б) для пентода с переменным потенциалом экранирующей сетки.

уравнений, составленных для эквивалентных схем (рис. 1. 5, 6 и 7):

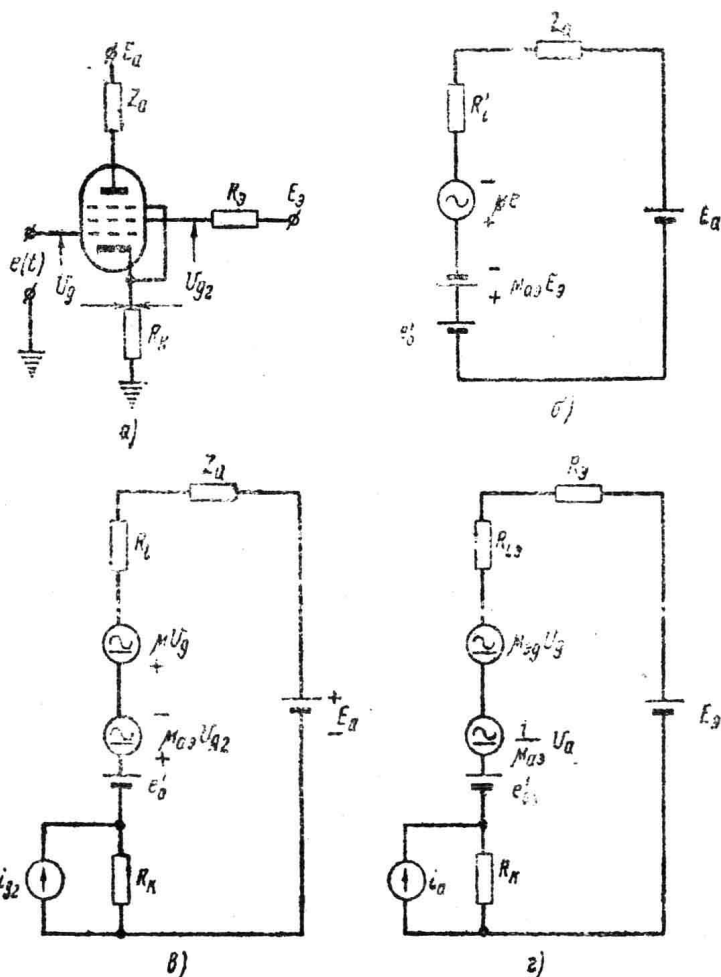


Рис. 1. 5. Эквивалентная схема анодной цепи пентода с переменным потенциалом экранирующей сетки.

$$E_a + \mu U_g + \mu_{ag} U_{g_2} - e'_0 = i_a (Z_a + R_l + R_k) + i_{g_2} R_k, \quad (1.6a)$$

$$E_g + \mu_{ag} U_g + \frac{1}{\mu_{ag}} U_a - e'_0 = i_a R_k + i_{g_2} (R_g + R_{lg} + R_k), \quad (1.6б)$$

$$U_g = e - (i_a + i_{g_2}) R_k, \quad (1.6в)$$

$$U_{g_2} = E_g - i_{g_2} (R_g + R_k) - i_a R_k, \quad (1.6г)$$

$$U_a = E_a - i_a (Z_a + R_k) - i_{g_2} R_k. \quad (1.6д)$$

Пользуясь этими соотношениями, можно получить следующее выражение для анодного тока:

$$i_a = \frac{E_a + \mu_{a3} E_3 - e_0 + \mu e}{Z_a + R_i'}$$

Из структуры формулы (1. 7) можно заключить, что эквивалентные параметры лампы, которые следует использовать в схеме рис. 1. 5, 6

$$\mu' = \mu, \quad (1. 8a)$$

$$R_i' = R_i \left[\frac{1}{\mu_{a3}} (\mu + \mu_{a3} + 1) \frac{R_K}{R_{i3}} + \frac{R_3}{R_{i3}} + 1 \right] + R_K (\mu + \mu_{a3} + 1), \quad (1. 8b)$$

$$S' = \frac{\mu'}{R_i'} = \frac{\mu}{\left\{ R_i \left[\frac{1}{\mu_{a3}} (\mu + \mu_{a3} + 1) \frac{R_K}{R_{i3}} + \frac{R_3}{R_{i3}} + 1 \right] + (\mu + \mu_{a3} + 1) R_K \right\}}. \quad (1. 8c)$$

Напряжение экранирования лампы. При анализе импульсных схем часто требуется аналитическое выражение напряжения экранирования триодов и многосеточных ламп по управляющей сетке. В приближенных расчетах удовлетворительные результаты обычно получаются при использовании величины напряжения экранирования — E_{g0} для спрямленных характеристик, определяемых соотношениями (1. 1a) и (1. 5).

Подставляя в эти формулы значения

$$U_g = -E_{g0}; \quad i_a = i_{g_1} = 0,$$

$$U_a = E_a, \quad U_{g_2} = E_{g_2},$$

где E_{g_1} — потенциал экранирующей сетки при $i_{g_1} = 0$, получаем:

$$E_{g0} = \frac{1}{\mu} (E_a - e_0) \quad (\text{триод}), \quad (1. 9a)$$

$$E_{g0} = \frac{1}{\mu} (E_a + I_0 R_i) \quad (\text{пентод с постоянным потенциалом экранирующей сетки}), \quad (1. 9б)$$

$$E_{g0} = \frac{[\mu_{a3} E_{g_2} + E_a - e_0]}{\mu} \quad (\text{пентод с переменным потенциалом экранирующей сетки}). \quad (1. 9в)$$

Эквивалентные схемы полупроводниковых триодов (транзисторов). Так же, как и для электронных ламп, при построении эквивалентных схем полупроводниковых триодов воспользуемся линеаризованными статическими характеристиками, связывающими выходные величины прибора, ток коллектора i_K и напряжение U_K между коллектором и базой.

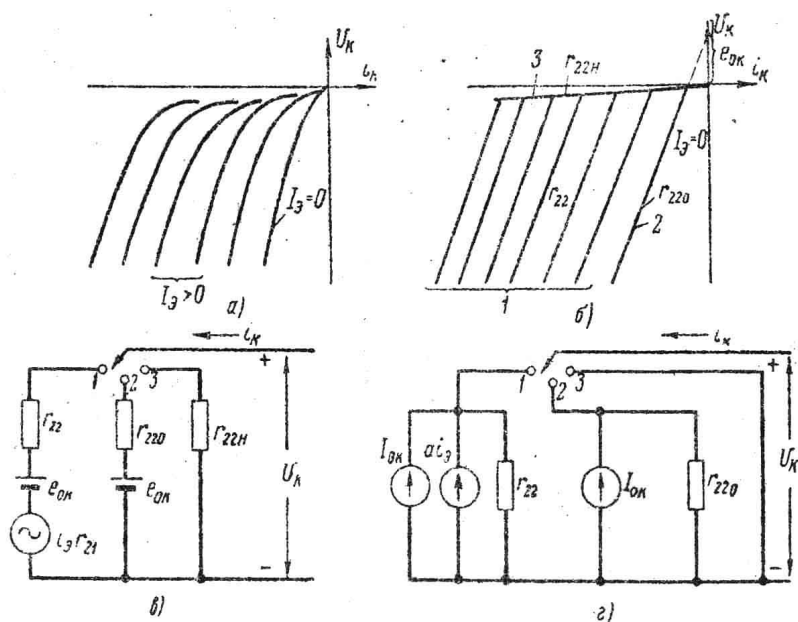


Рис. 1. 6. Эквивалентные схемы коллекторной цепи полупроводниковых триодов (транзисторов):

а — коллекторные характеристики; б — линеаризованные коллекторные характеристики; в и г — эквивалентные схемы. 1 — режим передачи; 2 — режим отсечки; 3 — режим насыщения.

Коллекторные характеристики для триода типа р — п — р изображены на рис. 1. 6, а. Триоды этого типа в настоящее время получили наибольшее распространение. Триоды типа п — р — п применяются обычно лишь в тех случаях, когда их использование совместно с триодами типа р — п — р существенно упрощает схему. Как известно, при включении в схему триодов этих двух типов требуются источники питания различной полярности как для эмиттера, так и для коллектора. Таким образом, для триода типа п — р — п вольтамперные характеристики будут лежать в области положительных напряжений и токов.