

П. А. Ворончев

ИМПУЛЬСНЫЕ ТИРАТРОНЫ

« СОВЕТСКОЕ РАДИО »

Глава и

нось

6.1.

6.2.

6.3.

6.4.

6

6.

объем-

. . . 140

. . . 143

. . . 146

. . . 152

. . . 154

157

Редакти-

ов

Сложка художника В. В. Волкова

Г-32378 Сдано в набор 22/VII 57 Подписано к печ. 19/XII 57 г.

Печ. л. 8,4 Бум. л. 2,56 Уч.-изд. л. 8,67 Зак. 413

Формат 84×103/32 Цена в переплете № 5—5 р. 35 к.

„ — „ № 7—6 р. 35 к.

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Предисловие</i>	3
<i>Глава первая Общие сведения об импульсных тиратронах</i>	
1.1. Устройство и некоторые характеристики импульсных тиратронов	7
1.2. Принципы использования и особенности работы импульсных тиратронов	10
1.3. Технические требования, предъявляемые к импульсным тиратронам, и их некоторые параметры	19
<i>Глава вторая Физические явления в импульсных тиратронах в предразрядную часть периода</i>	
2.1. Основные взгляды на теорию развития разряда в новых приборах с накаленным катодом	24
2.2. Экспериментальное исследование развития разряда в импульсных тиратронах	32
А. Процесс развития разряда	33
Б. Стабильность зажигания	52
В. Повышение стабильности зажигания	62
<i>Глава третья Физические явления в импульсных тиратронах в проводящую часть периода</i>	
3.1. Импульсное падение напряжения и вольтамперная характеристика	64
3.2. Искрение оксидного катода	84
3.3. Падение напряжения в сужениях электрического разряда и явление разрыва дуги	92
<i>Глава четвертая Физические явления в импульсных тиратронах в послеразрядную часть периода</i>	
4.1. Процесс деионизации и параметры, характеризующие частотные свойства импульсных тиратронов	98
4.2. Условия возникновения повторных зажигания и влияние параметров сеточной цепи на частотные характеристики импульсных тиратронов	104
<i>Глава пятая Анализ схемы линейного модулятора с питанием от источника постоянного тока</i>	
5.1. Формирующая схема линейного модулятора в виде искусственной длинной (цепной) линии	117
5.2. Анализ зарядной цепи линейного модулятора	119
5.3. Анализ разрядной цепи линейного модулятора	123
	163

Т. А. ВОРОНЧЕВ

ИМПУЛЬСНЫЕ ТИРАТРОНЫ

ИЗДАТЕЛЬСТВО „СОВЕТСКОЕ РАДИО“

МОСКВА — 1938

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Стр.	Строка	Напечатано	Должно быть
20	4 ч 5 сверху	$f \geq 500 \text{ гц}$	$f \leq 500 \text{ гц}$
65	4 снизу	$I_a^{2/3} = (U_a)$	$I_a^{2/3} = f(U_a)$
99	20 снизу	D_0	D_a
115	8 сверху	от 0,5 до 5 мксек	от 0,5 до 4 мксек
148	19 сверху	(6.1)	$P_{кр} = I_{a \text{ ср}} [(1 - \alpha) \times$ $\times (U_i + U_k) - \bar{\tau}] + I_{a \text{ эф}}^2 R_{окс}$
159	3 снизу	цепь	щель

Зак. 413.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Развитие радиолокационной техники в военные и последующие годы поставило перед нашей промышленностью новые требования, заключающиеся в разработке электровакуумных приборов на высокие анодные напряжения и большие импульсы тока при сравнительно низких средних значениях тока. Эти требования относились как к электронным, так и к ионным приборам.

Как известно, импульсное питание анодной цепи магнетрона осуществляется вспомогательным устройством — импульсным модулятором, назначение которого состоит в подаче на анод магнетрона периодически повторяющихся импульсов высокого напряжения. Эта задача решалась в первые годы развития радиолокационной техники с помощью вращающегося искрового разрядника, который периодически замыкал предварительно заряженную так называемую искусственную длинную линию на нагрузку, вызывая в последней прохождение импульса тока, приближающегося по своей форме к прямоугольной. Несколько позднее для той же цели стали использоваться мощные управляемые разрядники — тригатроны.

Как первое так и второе решение этой задачи имело целый ряд существенных технических недостатков. Указанные приборы обладали большой инерционностью, которая проявлялась в наличии значительного промежутка времени — времени зажигания, необходимого для развития разряда в приборе.

Вследствие непостоянства времени зажигания возникали большие трудности при использовании названных приборов в целом ряде устройств, в частности в радиолокационных установках.

Основным требованием современных радиолокационных устройств является постоянство времени зажигания, так как в противном случае нарушается синхронизация работы

отдельных частей устройства. Абсолютная величина времени зажигания не играет существенной роли и не является препятствием к применению ионных приборов в радиолокационных устройствах.

Вышеуказанному требованию не удовлетворяли модуляторы с вращающимися искровыми разрядниками, в которых непостоянство времени зажигания достигало нескольких десятков микросекунд. Также часто затруднялось применение модуляторов, использующих тригatronы, у которых указанное время хотя и было меньше, но все же достигало иногда нескольких микросекунд.

Применение импульсных ртутных тиратронов не изменило положения. Здесь возникли новые трудности в связи с весьма интенсивным распылением анода лампы под действием высоких обратных напряжений, а также в связи с небольшой скоростью деионизации паров ртути. Сильная зависимость плотности ртутного пара от окружающей температуры создавала дополнительные препятствия к использованию ртутных тиратронов.

Дальнейшие исследования в области ионной техники показали, что при использовании водорода в качестве наполняющего прибор газа можно получить хорошие результаты. В итоге появился новый ионный прибор — водородный тиратрон, который быстро нашел широкое применение благодаря целому ряду достоинств. К основным достоинствам водородного тиратрона следует отнести большую скорость деионизации и высокий критический потенциал водорода. Последнее свойство водорода допускает работу оксидного катода при больших импульсных падениях напряжения в тиратроне без серьезного ущерба для катода.

Последующее усовершенствование водородного тиратрона, которое заключалось в разработке специального источника водорода (генератора водорода), непрерывно пополняющего потери газа в лампе, вызванные поглощением, значительно упростило технологию изготовления водородных тиратронов и повысило их долговечность.

Первые опытные образцы отечественных импульсных водородных тиратронов были разработаны в 1949 г. Они допускали возможность работы при частоте повторения импульсов до 4 000 гц и мощности в импульсе 125 квт (тиратрон типа ТГИ1-50/5). Вскоре после этого были разработаны другие типы импульсных тиратронов ТГИ1-90/8, ТГИ1-325/16, ТГИ1-400/3 и др. Характерной особенностью всех вышеперечисленных типов импульсных тиратронов

являлось то, что они допускали работу при сравнительно низких частотах (до 1 000—4 000 гц).

Дальнейшее развитие радиолокационной и других областей техники вызвало необходимость перехода к работе с импульсами при очень высокой частоте повторения импульсов (от 6 000 до 30 000 гц) и малой скважности (до 125). Одновременно с этим достаточно ясно наметилась тенденция, направленная к уменьшению (до 0,1—0,2 мксек) длительности импульсов генерируемых колебаний. Это выдвинуло новое требование к импульсным тиратронам, заключающееся в максимально возможном понижении времени развития разряда в стадии формирования дугового разряда в тиратроне, от которого зависит минимальная длительность фронта импульса анодного тока.

В результате опыта, приобретенного в процессе предшествующих разработок, в середине 1950 г. были разработаны опытные образцы высокочастотного импульсного тиратрона типа ТГИ1-130/10. В этом тиратроне благодаря новой системе зажигания были получены высокая стабильность зажигания, небольшое время развития разряда и прекрасные частотные свойства, допускающие его работу при частоте повторения импульсов до 30 000 гц.

Успех, достигнутый при разработке тиратрона ТГИ1-130/10, был получен в результате экспериментального и теоретического исследований физических процессов, происходящих при импульсном разряде в тиратронах.

В настоящей работе приводятся материалы вышеуказанных исследований, полученные автором и сотрудниками руководимой им лаборатории, а также некоторые данные, полученные в других лабораториях, в частности, на кафедре «Промышленная электроника» Московского энергетического института.

Весь материал, относящийся к исследованию физических процессов, разбит на три раздела. Первый раздел посвящен рассмотрению физических процессов в тиратроне в предразрядную часть периода (глава 2), второй раздел — проводящей части периода (глава 3) и третий — послеразрядной части периода (глава 4). Изложению этого материала предшествует глава 1, в которой даются общие сведения об импульсных тиратронах. Автор считал полезным рассмотреть также некоторые специальные вопросы, связанные с работой тиратрона (глава 5) и вопросы, относящиеся к технологии и конструкции импульсных тиратронов (глава 6).

Работа преследует цель служить пособием для лиц, проектирующих различного рода устройства, использующие импульсные тиратроны, а также для конструкторов, разрабатывающих импульсные приборы.

В заключение выражаю мою благодарность проф. И. Л. Каганову за руководство работой, доктору техн. наук Я. С. Ицхоки за ряд ценных указаний при рецензировании рукописи, а также инженерам М. В. Дмитриевой и Л. И. Фрейдберг за некоторые полезные замечания.

Автор

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИМПУЛЬСНЫХ ТИРАТРОНАХ

1.1. УСТРОЙСТВО И НЕКОТОРЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИМПУЛЬСНЫХ ТИРАТРОНОВ

Импульсный тиратрон представляет собой трехэлектродную газонаполненную лампу с резко выраженной положительной пусковой характеристикой.

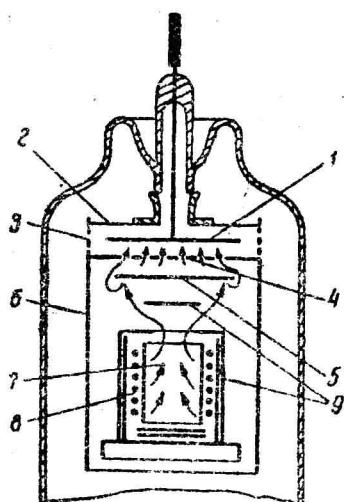
Главной особенностью этих тиратронов является то, что они рассчитаны для импульсной работы при очень малых длительностях тока, причем некоторые из них допускают работу в весьма напряженных электрических режимах. В этих режимах анодное напряжение достигает 38 кВ, ток в импульсе — 2 000 а и частота повторения импульсов — 6 000 и даже 30 000 гц. Длительность импульса анодного тока колеблется в пределах от 0,15 до 20 мксек.

Область частот, которая наиболее широко применяется в устройствах, использующих импульсные тиратроны, находится в пределах от 400 до 1 000 гц, а длительность импульса чаще всего не выходит за пределы от 0,25 до 1 мксек.

В настоящее время наметились два основных конструктивных варианта импульсных тиратронов (см. ниже § 6.7). Наибольшее распространение как в заграничной, так и в отечественной практике получил конструктивный вариант, схематическое изображение основных узлов которого показано на рис. 1.1.

Из рисунка видно, что анод тиратрона представляет собой плоский диск 1, который со всех сторон тщательно экранируется. Сверху анод экранируется сплошным дисковым экраном 2, а с боковой части пояском 3, который изготавливается из густого сетчатого полотна из тонкой воль-

фрамовой или никелевой проволоки. Сетчатое полотно применяется с целью лучшего охлаждения анода. Ниже анода на расстоянии $2 \div 3$ мм от него находится управляющий электрод сетки 4. Он представляет собой шайбу, внутреннее отверстие которой закрыто проволочной решеткой, имеющей сравнительно большие ячейки (отверстия). Для того чтобы после анода не проникало к катоду через отверстия решетки, последние снизу экранируются поджигающим электродом сетки 5. Поджигающий электрод



1.1. Схематическое изображение анодно-сеточного и катодного узлов импульсного тиратрона.

готовляется в виде плоского диска, диаметр которого берется на $5 \div 7$ мм больше диаметра проволочной решетки, благодаря чему он несколько перекрывает отверстия в решетке. Расстояние между управляющим и поджигающим электродами сетки порядка $3 \div 4$ мм. Все названные выше электроды (2, 3, 4, 5) электрически между собой связаны и находятся под потенциалом сетки. Они крепятся в корпусе сетки 6, представляющем собой цилиндр, охватывающий анод и катод тиратрона.

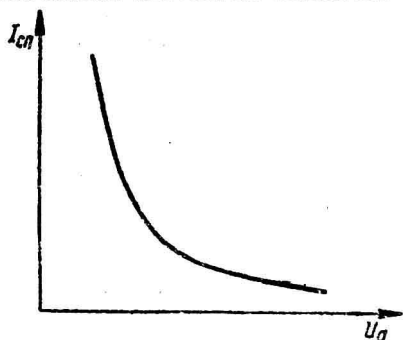
Катод 7 — оксидный, подогревный. Он представляет собой полый цилиндр, внутренняя рабочая поверхность кото-

рого покрыта оксидом, а на внешней находится подогреватель 8, изготовленный в виде бифилярной спирали (часто бывает и наоборот, подогреватель находится внутри цилиндра, а внешняя поверхность цилиндра покрывается оксидом). Для уменьшения мощности накала катода последний окружен со всех сторон тепловыми экранами 9, которые имеют потенциал катода. Верхний экран, расположенный над катодом, защищает, кроме того, сетку от напыления на нее с катода бария.

Легко видеть, что при такой конструкции тиратрон должен иметь резко выраженную положительную пусковую характеристику. Последняя характеризуется тем, что для зажигания тиратрона уже недостаточно подать на сетку положительное напряжение, а необходимо, чтобы его вели-

чина превышала напряжение зажигания сетки и была бы достаточной для поддержания в цепи сетки некоторого тока, необходимого для зажигания тиратрона.

Развитие разряда в импульсных тиратронах происходит так, что сначала разряд зажигается на сетку тиратрона (поджигающий электрод сетки), а затем по достижении током сетки определенной величины, называемой пусковым сеточным током, разряд через отверстия в управляющем электроде сетки перебрасывается на анод тиратрона *. В указанный момент времени, называемый моментом зажигания тиратрона, начинается формирование дугового разряда между анодом и катодом тиратрона (стадия пробоя), что характеризуется весьма быстрым ростом тока и резким падением анодного напряжения. Окончанием стадии пробоя считается момент времени, когда анодное напряжение стабилизируется.



1.2. Пусковая характеристика импульсного тиратрона на постоянном токе.

Так как источник сеточного напряжения имеет некоторое внутреннее сопротивление, то для получения необходимого для зажигания тиратрона пускового сеточного тока нужно учитывать падение напряжения в указанном сопротивлении, а также падение напряжения в промежутке сетка — катод тиратрона. В связи с этим напряжение, необходимое для поджига тиратрона, при одном и том же анодном напряжении в зависимости от значений вышеуказанных величин может быть разным. Поэтому практически оказалось удобным в качестве пусковой характеристики импульсных тиратронов устанавливать связь не между анодным напряжением и напряжением сетки, как это делалось для других типов тиратронов, а между анодным напряжением и пусковым током сетки.

Типичный вид пусковой характеристики импульсных тиратронов, снятой на постоянном токе, показан на рис. 1.2.

При импульсном управлении зажиганием тиратрона,

* Предполагается, что сетка питается от постоянного источника напряжения.

когда на сетку подаются импульсы напряжения определенной длительности, пусковой ток сетки значительно увеличивается; его величина будет тем больше, чем меньше длительность импульсов, однако, характер зависимости пускового тока от анодного напряжения остается прежним.

В качестве газа, наполняющего импульсные тиратроны, применяется самый легкий газ — водород. Импульсные тиратроны, предназначенные для работы на сравнительно низких частотах наполняют иногда инертным газом. Водород обладает относительно большей скоростью деионизации. Только применение этого газа позволило сконструировать импульсные тиратроны, работающие при частоте достигающей 30 кГц.

Ценность водорода как газа, используемого для наполнения импульсных тиратронов, значительно повысилась после разработки генератора водорода, представляющего собой ампулу, наполненную порошком гидрида титана. Генератор водорода обладает свойством выделять при нагревании водород и при неизменной температуре поддерживать в баллоне лампы определенное давление газа. Нагрев генератора водорода производится от специального подогревателя, который соединяется параллельно с накалом катода тиратрона.

При выключении напряжения накала в баллоне тиратрона создается высокий вакуум, вследствие поглощения газа генератором водорода при его остывании.

После включения накала относительная стабилизация давления газа в лампе наступает не сразу. Ввиду этого импульсные тиратроны требуют большого времени разогрева, порядка 3—5 минут. Включение тиратрона ранее этого времени сопровождается сильным перегревом анода, что часто приводит к преждевременному выходу лампы из строя.

Вследствие сильной зависимости давления газа от температуры генератора водорода, при эксплуатации импульсных тиратронов не допускается изменение напряжения накала катода более чем на $\pm 5 \div 7,5\%$.

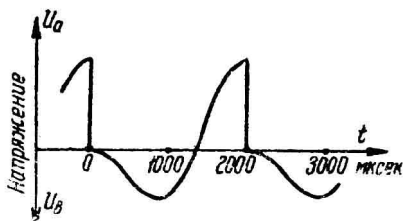
Г2. ПРИНЦИП ИСПОЛЬЗОВАНИЯ И ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ИМПУЛЬСНЫХ ТИРАТРОНОВ

Как упоминалось выше, импульсные тиратроны предназначаются для работы в качестве мощных разрядных приборов в линейных импульсных модуляторах, используемых для формирования импульсов высокого напряжения прямоугольной формы

Условия работы импульсных тиратронов существенным образом зависят от выбора электрической схемы линейного модулятора. Эти условия в значительной мере определяются величиной и формой обратного анодного напряжения. В этом отношении схемы линейных модуляторов следует подразделить на схемы с питанием от источника переменного тока, в которых обратное напряжение велико и может достигать почти прямого, и схемы с питанием от источника постоянного тока, в которых обратное напряжение мало или практически совершенно отсутствует.

Первые схемы, т. е. схемы с питанием от источника переменного тока, применялись преимущественно в первые годы развития радиолокационной техники, когда в качестве импульсных тиратронов использовались ртутные тиратроны. Плохие деионизационные свойства ртутных тиратронов не позволяли их использовать в других схемах.

На рис. 1.3 приводится временная диаграмма изменения анодного напряжения тиратрона в одной из схем линейного модулятора, применявшейся ранее в радиолокационных станциях. В этой схеме в качестве источника питания модулятора использовался генератор переменного тока частотой 500 гц. Как следует из рис. 1.3, в течение $\frac{3}{4}$ периода тиратрон подвергался воздействию на него обратного анодного напряжения, достигающего 50% от прямого. Только через 1500 мксек на тиратроне появлялось положительное анодное напряжение, т. е. появлялась возможность возникновения повторных зажигания. Этот промежуток времени оказывался достаточным для того, чтобы в ртутном тиратроне произошла деионизация. Таким образом, несмотря на малую скорость деионизации ртутных тиратронов, они все же находили в прошлом применение, благодаря использованию линейных модуляторов с питанием от источника переменного тока. Эти схемы имели ряд недостатков. Вследствие высокого отрицательного анодного напряжения в них возникали обратные зажигания тиратрона и наблюдалось сильное распыление деталей лампы, главным образом анода, под действием ионной бомбардировки. При эксплуатации ртутных тиратронов отмечались нередко случаи, когда

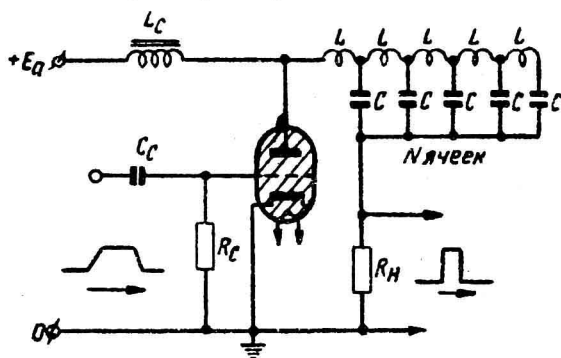


1.3. Временная диаграмма изменения анодного напряжения тиратрона.

отверстия в управляющем электроде сетки заполнялись мелкими частицами распыленного материала, в результате чего нарушалась нормальная работа тиратрона.

Указанных недостатков почти совершенно лишены схемы линейных модуляторов с питанием от источника постоянного тока. Применение этих схем оказалось возможным только благодаря разработке водородных тиратронов, имеющих большую скорость деионизации.

На рис. 1.4 приводится принципиальная схема линейного модулятора с питанием от источника постоянного тока. Разберем в общих чертах работу этой схемы.



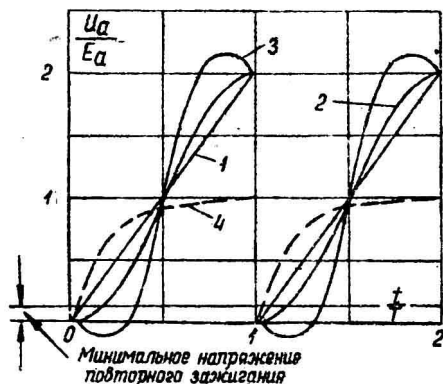
1.4. Принципиальная схема линейного модулятора, работающего на активную нагрузку.

Пусть в некоторый момент времени к схеме линейного модулятора будет приложено от источника постоянного тока напряжение E_a . Тогда по цепи, состоящей из зарядного дросселя с индуктивностью L_c формирующей линии и сопротивления нагрузки R_n потечет зарядный ток, который будет заряжать конденсаторы линии. Формирующая линия представляет собой искусственную длинную (цепочечную) линию, состоящую из ячеек, содержащих L и C . В процессе заряда формирующей линии будет расти и напряжение на аноде тиратрона. Повышение анодного напряжения не может привести к зажиганию тиратрона, так как он обладает положительной пусковой характеристикой.

В некоторый фиксированный момент времени на сетку тиратрона от генератора управляющих импульсов поступает положительный импульс напряжения. Почти мгновенно

* Ради простоты рассуждений предполагается, что сопротивление R_n нагрузки не обладает вентильными свойствами ($R_n = \text{const}$).

но с этим возникает зажигание разряда на сетку тиратрона с последующим перебрасыванием разряда на анод и зажиганием тиратрона. В результате формирующая линия разрядится через тиратрон на нагрузку R_n , вызвав в последней прохождение импульса тока, приближающегося по своей форме к прямоугольной. По окончании импульса тока тиратрон гаснет и в нем начинается процесс деионизации. Через некоторый сравнительно малый промежуток времени



1.5. Анодное напряжение тиратрона при разных режимах заряда формирующей линии:

1 — линейный; 2 — резонансный; 3 — колебательный; 4 — экспоненциальный (при $T = 3 R_a C_N$).

управляющее действие сетки восстановится и снова повторится заряд и последующий затем разряд формирующей линии. Описанный процесс будет протекать периодически, с частотой, задаваемой генератором управляющих импульсов.

В зависимости от емкости конденсаторов формирующей линии, индуктивности зарядного дросселя и частоты повторения импульсов имеет место один из трех возможных режимов заряда линии: резонансный, колебательный или линейный.

На рис. 1.5 приводятся кривые, соответствующие указанным трем режимам заряда линии.

Условия, необходимые для резонансного режима заряда, определяются выражением (1.1), для линейного — выражением (1.2) и для колебательного — (1.3):

$$\dot{f} = \frac{1}{\pi \sqrt{L_c C_N}}, \quad (1.1)$$

$$f > \frac{1}{\pi \sqrt{L_c C_N}}, \quad (1.2)$$

$$f < \frac{1}{\pi \sqrt{L_c C_N}}, \quad (1.3)$$

где $f = \frac{1}{T}$ — частота повторения импульсов;

L_c — индуктивность зарядного дросселя;

C_N — общая емкость формирующей линии (N — число ячеек).

При замене зарядного дросселя активным сопротивлением R_a имел бы место заряд по экспоненциальному закону. Кривая для этого случая показана на рис. 1.5 пунктирной линией.

Резонансный режим заряда в ряде случаев является наиболее предпочтительным. Основное его преимущество заключается в том, что после погасания тиратрона анодное напряжение остается в течение более длительного времени, чем при линейном и экспоненциальном режимах заряда, ниже величины минимального напряжения повторного зажигания* и, следовательно, для деионизации газа отводится большее время. Это обеспечивает возможность работы импульсных тиратронов в случае резонансного режима заряда при сравнительно более высоких частотах.

Линейный режим заряда нашел также довольно широкое применение, хотя наряду с достоинствами он имеет целый ряд недостатков, о которых будет сказано ниже.

Экспоненциальный режим заряда вследствие низкого к. п. д. зарядной цепи, понижающегося до 50%, применяется почти исключительно в маломощных схемах, где потери мощности не так существенны. Что касается колебательного режима заряда, то он практически не применяется вследствие того, что в этом режиме тиратрон не используется полностью по анодному напряжению, что снижает импульсную мощность тиратрона (см. ниже).

Из кривых рис. 1.5 видно, что напряжение, при котором происходит разряд формирующей линии значительно превышает напряжение источника питания. При согласовании сопротивления нагрузки с характеристическим сопротивле-

* Минимальное напряжение повторного зажигания — наименьшее анодное напряжение, при котором может произойти повторное зажигание тиратрона и срыв его импульсной работы. Его величина примерно равна падению напряжения в тиратроне, т. е. $100 \div 150$ в.