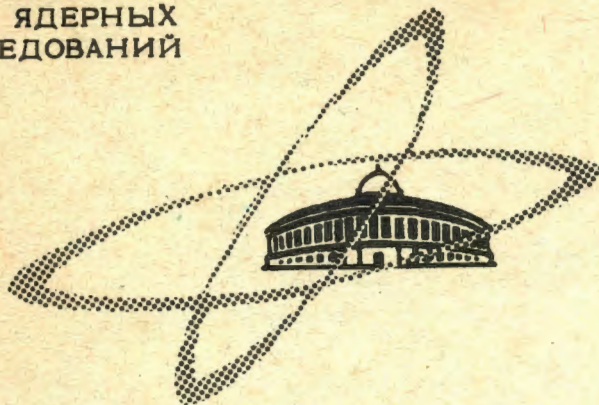


E-645

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна



P9 - 3675

И.Б.Енчевич, Т.Н.Томилина

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

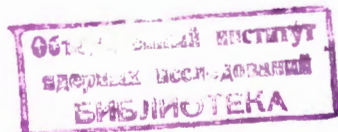
АНАЛИЗ РАБОТЫ ТИРАТРОННОГО ТРИГГЕРА  
С НЕЛИНЕЙНОЙ НЕСИММЕТРИЧНОЙ НАГРУЗКОЙ

1968

Р9 - 3675

И.Б.Енчевич, Т.Н.Томилина

АНАЛИЗ РАБОТЫ ТИРАТРОННОГО ТРИГГЕРА  
С НЕЛИНЕЙНОЙ НЕСИММЕТРИЧНОЙ НАГРУЗКОЙ



Preprint, Joint Institute for Nuclear Research,  
Dubna, 1968

The schemes of thyatron triggers with non-linear asymmetrical loading are analysed. The criteria of a stable operation of such triggers are given and a method for calculation of a loaded trigger scheme is suggested taking into account the effect of the reverse conduction of thyatrons.

Analysis of Operation of a Thyatron Trigger with  
Non-Linear Asymmetrical Loading

Enchevich I.B., Tomilina T.N.  
P9-3675

Preprint Объединенного института ядерных исследований,  
Дубна, 1968.

Проведен анализ схем тиратронных триггеров с нелинейной несимметричной нагрузкой. Приводятся критерии устойчивой работы таких триггеров и предлагается метод технического расчета обобщенной схемы нагруженного триггера с учетом влияния обратной проводимости тиратронов.

Анализ работы тиратронного триггера с нелинейной  
несимметричной нагрузкой

Енчевич И.В., Томилина Т.Н.  
P9-3675

## В в е д е н и е

В синхроциклотроне для ускорения заряженных частиц используется напряжение с понижающейся частотой. Частотная модуляция, как правило, осуществляется при помощи вращающегося конденсатора переменной емкости.

Ввиду того, что ускорение частиц происходит только при понижении частоты в.ч. генератора, целесообразно залипать генератор на время нерабочей части периода модуляции. Для этой цели на синхроциклотроне на 680 Мэв используется тиратронный манипулятор<sup>/1/</sup>.

При работе синхроциклотрона в различных режимах ускорения<sup>/2,3,4,5,6/</sup> изменяется как мощность, потребляемая в.ч. генератором, так и скважность последнего<sup>/4,5/</sup>. В связи с этим манипулятор (рис. 1), изготовленный по первоначальному техническому заданию, в котором эти режимы не были предусмотрены, стал работать неустойчиво.

Необходимо было исследовать и устранить причины неустойчивой работы манипулятора.

Для объяснения причин неустойчивой работы манипулятора сначала целесообразно рассмотреть его работу без нагрузки, а затем изменения, вносимые подключением нагрузки. Влияние нагрузки сводится как к протеканию через горящий тиратрон постоянной составляющей сеточного тока генератора, так и к параллельному подключению к участку катод-анод управляющего тиратрона шунтирующего сопротивления цепи гридлика и промежутка сетка-катод генераторной лампы. После выяснения причин неустойчивой работы существующей схемы нагруженного триггера исследуются схемы, обеспечивающие надежную работу в.ч. генератора в рабочих режимах.

Вобщем говоря, тиратроны являются неидеальными переключающими элементами и вносят дополнительные нелинейности в рассматриваемые схемы. Она выкажается, во-первых, в том, что имеется небольшое падение напряжения на проволочном тиратроне, которое не зависит от величины тока, протекающего через тиратрон, во-вторых, в том, что при приложении к проволочному тиратрону напряжения обратная полярности он в течение короткого времени пропускает ток в обратном направлении и образует конечной проволочностью, меньшей на один-два порядка проводимости в прямом направлении, и, в-третьих, в конечном времени, необходимом как для поджига тиратрона после подачи поджигающего импульса, так и для восстановления сеточного запирающего напряжения после обратного напряжения (конечность времени ионизации и деионизации).

Висимым источником тока  $I_0$  . того, следует учитывать, что во время генерации сеточная цепь является неза- от полярности приложенного напряжения соответствующего источника. Кроме ранняя  $E_0$  . Поэтому сопротивление нагрузки следует учитывать в зависимости не сетке генераторной лампы будет достигнуто отрицательное напряжение затри- который обладает односторонней проводимостью по момента времени, когда на рис. 1 схема содержит нелинейный элемент - эквивалентный диод, принимаемая для цепей с линейными элементами, в то время как приведенная применяемая вышележающую методику, следует, однако, учитывать, что она ются коротким замыканием.

При определении постоянной времени источника постоянной частоты  $\theta$  - постоянная времени цепи  $\theta/8$  . решением дифференциального уравнения:  $i(0)$  - начальное значение функции; где  $i(\infty)$  - установившееся значение искровой функции, являющаяся частью

$$i(t) = i(\infty) - [i(\infty) - i(0)] e^{-\frac{t}{\theta}} \quad (1)$$

где  $a_1$  и  $a_2$  - постоянные, являющиеся функциями: Решением дифференциального уравнения вида  $i'(t) + a_1 i(t) = a_2$ , ко один реактивный элемент - емкость - и подвержены воздействию постоянных внешних элс. Решением дифференциального уравнения вида  $i'(t) + a_1 i(t) = a_2$ , переходные процессы анализируемых в работе триггеров описываются дифференциальными уравнениями первого порядка, так как их схемы содержат только-

Тем не менее, период работы манипулятора можно разбить на временные интервалы, для каждого из которых допустима линейная аппроксимация. Решения на отдельных участках "сшиваются", для чего используется непрерывность функции  $f(t)$  от времени.

Ток в каждой ветви схемы получается из суперпозиции токов постоянного источника и соответствующей доли, найденной при помощи законов Кирхгофа, переменного емкостного тока. Полный емкостный ток  $I_c$  определяется следующим образом:

$$I_c = c f'(t) = -\frac{c}{\theta} [f(\infty) - f(0)] e^{-\frac{t}{\theta}}, \quad (2)$$

где  $f(t)$  — напряжение на конденсаторе.

В необходимых случаях учитывается влияние постоянной составляющей сеточного тока генератора на работу триггерной схемы.

Проведенный анализ может быть использован для расчёта не только тиратронных схем, но и для любых вентильных схем с конечным временем восстановления вентильных свойств, в частности, для триггерных схем на тиристорах.

### 1. Переходные процессы в ненагруженном симметричном тиратронном триггере

Работа симметричного тиратронного триггера на холостом ходу (ключ К на рис. 2 разомкнут) рассматривалась<sup>9,10,11/</sup> без учёта влияния обратной проводимости погасающего тиратрона и неполного заряда конденсатора триггера до напряжения источника. Ученные в настоящем рассмотрении влияния обратного тока и неполного заряда объясняют выбросы на осциллограммах токов, а также ограничения запирающих свойств триггера, использованного в качестве манипулятора в.ч. генератора.

Поскольку тиратроны являются неидеальными переключающими элементами, они имеют:

- а) конечное прямое падение напряжения;
- б) малую, но конечную обратную проводимость в течение короткого времени;
- в) временную задержку между моментом подачи импульса положительной полярности на сетку тиратрона и поджигом тиратрона;

г) конечное время восстановления сетевого запитания.

В Приложении приведен материал, использованный для качественной оценки реальных переключающих характеристик тиристоров (работающих в режиме переключения). Там же указаны и величины параметров схемы.

При запуске тиристора напряжение горения  $U$  на нем устанавливается не мгновенно, а в течение некоторого времени. Погасание его и установление обратного напряжения тоже происходит за конечное время (см. рис. 3). Это связано с индукционно-емкостными процессами в тиристорах, которые для своего развития требуют  $10^{-4}/10^{-5}$  определенной заряды, составляющего  $10^{-5}-10^{-4}$  кул. В начале этих быстропроисходящих процессов сопротивление погасющего и загорящегося тиристора примерно равно, о чем можно судить по осциллограммам прямого и обратного напряжения (рис. 4), потом они начинают быстро переправляться. О порядке величин суммарных сопротивлений в первый момент времени можно судить по выбросу тока, протекающего через загорящийся тиристор. При параметрах схемы, приведенных в Приложении, выброс превышает примерно на порядок стабилонный ток схемы (рис. 5). В дальнейшем для простоты считаем, что при перераспределении сопротивлений на погасшем и загорящемся тиристоре сумма этих сопротивлений остается постоянной и меньше сопротивления ленин плеч на порядок, а обратное сопротивление, равное бесконечности на погасшем тиристоре, и сопротивление, соответствующее падению напряжения на загорящемся тиристоре, соответственно скачком по истечении  $10$  мксек (рис. 6). Фактически этот процесс происходит непрерывно, но спланные допущения позволяют не только качественно правильно объяснить наличие выбросов, но и оценить их величину.

Период работы такого тиристорного триггера можно разбить на несколько временных интервалов; для простоты считаем, что начало каждого интервала соответствует моменту времени  $t = 0$ .

Для наглядности рассмотрим эквивалентные схемы, соответствующие каждому интервалу времени для источника постоянного э.с. и разрядной цепи, а также расчётные формулы, представленные в таблице 1.

Падение напряжения на горящем тиристоре принималось равным  $1\%$  от напряжения источника питания  $U_0$ .

В первом интервале времени поджигающий импульс поступает на сетку тиристора  $T_1$ . По истечении времени индукции тиристор  $T_1$  отпирается, при

этом тириатрон  $T_2$  обладает обратной проводимостью. Длительность первого интервала времени  $t_1$  равна времени существования обратной проводимости у тириатрона  $T_2$ .

Обратная проводимость тириатрона  $T_2$  меняется от величины, равной проводимости горящего тириатрона в начале первого интервала времени до обратной проводимости  $=0$  перед погасанием тириатрона  $T_2$ , но для простоты мы будем считать, что в течение всего первого интервала длительностью  $t_1$  обратная проводимость  $R_0^{-1}$  остается равной  $R_T^{-1}$ .

Конденсатор  $C$  был заряжен до напряжением  $U$ , причём пластина  $A$  обладала отрицательным зарядом. Интересно рассмотреть в первом интервале времени момент, когда сопротивление тириатрона в обратном направлении равно сопротивлению в прямом направлении  $R_C = R_T$ .

Второй интервал времени длительностью  $t_2$  начинается с момента погасания тириатрона  $T_2$ . При этом (см. табл. 1) возрастает постоянная времени цепи, а конденсатор получает возможность перезарядиться до  $U_0(\infty) = -(E - \Delta U)$ .

В третьем и четвертом интервалах времени, имеющих длительности  $t_3$  и  $t_4$ , соответственно, процессы происходят так же, как в первом и втором. В полученных уравнениях следует только поставить соответствующие индексы у сопротивлений и учесть отличие в начальных и конечных условиях.

Неизвестная величина начального напряжения на конденсаторе получается из условия самосогласования

$$U_0(0) = U_0(t_4) \quad (3)$$

$$T = \sum_{i=1}^4 t_i,$$

где  $T$  — период работы триггера.

Обозначим максимальное напряжение, до которого можно зарядить конденсатор, через  $U_m = E - \Delta U$ , где  $E$  — напряжение источника питания,  $\Delta U$  — падение напряжения на проводящем тириатроне. При этом  $U = K U_m$ , где

$$K = \frac{1 - e^{-\frac{t_1}{\theta_4}} [1 - e^{-\frac{t_2}{\theta_3}} (1 - e^{-\frac{t_3}{\theta_2}})]}{1 - e^{-\sum_{i=1}^4 \frac{t_i}{\theta_i}}} \quad (4)$$



тока, равную:

Ток  $I_0$  отличается от тока прямой проводимости соответствующего тиратрона практически только на величину постоянной составляющей тиратронного

этом время  $t_0$  максимально.

Наибольшая устойчивость схемы достигается при  $t_2/T = 0,5$ , так как при анака совпадает с напряжением на конденсаторе  $U_0$  (с разницей на  $\Delta U$ ). Катоды тиратронов  $U^A$  и  $U^B$  в непроходящей части периода с точностью до соответствено 8 и 4 мксек. Из приведенных графиков видно, что напряжение на линиях для разных отношений  $t_2/T$  и для двух значений периодов  $T$ , равных токам, результаты которых представлены на графиках (рис. 7) в относительных По формулам, приведенным в таблице 1, сделаны расчеты напряжений и работы триггера при помощи порывания анодного напряжения манипулятора  $F$ .

Ниже будет показано, что и в нагруженном триггере дело обстоит аналогичным образом. Этим объясняются неудачные попытки повысить устойчивость

не зависит от напряжения источника питания триггера.

Из приведенных выражений (5) для  $t_{01}$  и  $t_{02}$  видно, что при сделанных допущениях ( $\Delta U \ll E$  и  $\frac{E}{U} = \frac{E - \Delta U}{U} = 1$ )  $t_{01}$  и  $t_{02}$  практически

$$t_{01} = \theta_1 \ln \left[ 1 + e^{-\frac{\theta_1}{t_2} \left[ 1 - e^{-\frac{\theta_2}{t_2} (1 + K_e)} - \frac{\theta_1}{t_1} \right] \right] \quad (5)$$

(5)

$$t_{02} = \theta_2 \ln (1 + K_e - \frac{\theta_1}{t_1})$$

где

ратронов схемы  $T_2$  и  $T_1$  это время обозначается соответствено  $t_{02}$  и  $t_{01}$ . становления сеточного запария (порядка 100+300 мксек  $1/11$ ). Для обеих тиратронной работы схемы является  $t_0 > t_{вса}$ , где  $t_{вса}$  - время восстановления напряжения в прямом направлении, поэтому необходимым условием трона спадает до 0. По истечении времени  $t_0$  на ранее запертом тиратроне  $t_0$ , в течение которого положительное напряжение на катоде запертого тиратрона является переключаются свойства схемы ограничивается временем ношением  $t_2/T$  (т.к.  $t_1$  и  $t_2$  малы). Коэффициент заряда конденсатора  $K$  в основном определяется  $T$  и от-

$$I_0 = \frac{E - \Delta U}{R_s} .$$

Представленная на рис. 8 фотография осциллограммы напряжения одного из тиратронов схемы на холостом ходу, как видно, хорошо совпадает с вышеприведенным расчётом.

## 2. Переходные процессы в нагруженном тиратронном триггере

Как видно из анализа работы схемы ненегруженного тиратронного триггера, в процессе работы на каждом из его катодов периодически появляются импульсы напряжения отрицательной полярности, скорость нарастания фронта которых определяется постоянной времени  $RC$ . Эти импульсы и использовались для гашения генерации в.ч. генератора, если сеточная цепь последнего замкнута через горящий тиратрон (рис. 1,2, ключ  $K$  замкнут). В этом случае, однако, в работе триггера появляются существенные отличия по сравнению с рассмотренным нами случаем холостого хода. Отличия вызваны тем, что:

а) обратное сопротивление управляющего тиратрона, замыкающего сеточную цепь в.ч. генератора, оказывается шунтированным сопротивлением гридлика и промежутка сетка-катод генераторной лампы<sup>/7/</sup>, тем самым симметрия схемы нарушается;

б) промежуток сетка-катод генераторной лампы, по существу, является диодом с односторонней проводимостью, определяемой не только величиной приложенного напряжения со стороны манипулятора, но и режимом работы в.ч. генератора. Проводимость эквивалентного диода исчезает только после того, как напряжение на сетке достигнет значения запирающего напряжения  $E_s$  ;

в) через управляющий тиратрон  $T_1$  манипулятора протекает постоянная составляющая сеточного тока в.ч. генератора, превосходящая по величине рабочий ток тиратрона на холостом ходу и в значительной степени увеличивающая время восстановления сеточного запирающего тиратрона (см. Приложение, рис. 31).

Период работы нагруженного триггера следует разделить на пять отрезков времени. В течение трех первых интервалов он работает как на холостом ходу. Четвертый отрезок времени будет соответствовать шунтированию тиратрона

Всегда  $K < 1$ , если же

$$1 + e^{-\frac{\theta_2}{T_2}} [1 - e^{-\frac{\theta_2}{T_2}} (1 + K e^{-\frac{\theta_1}{T_1}})] > 0,$$

и для тиратрона  $T_2$  это время равно:

$$t_{02} = \theta_2 \ln(1 + K e^{-\frac{\theta_1}{T_1}}). \quad (8)$$

равно:

$$t_{01} = \theta_1 \ln \left\{ 1 + e^{-\frac{\theta_2}{T_2}} [1 - e^{-\frac{\theta_2}{T_2}} (1 + K e^{-\frac{\theta_1}{T_1}})] \right\}. \quad (7)$$

Время восстановления прямого напряжения на управляющем тиратроне  $T_1$

$$K = \frac{1 - e^{-\frac{\theta_1}{T_1}} - \frac{\theta_1}{T_1} e^{-\frac{\theta_1}{T_1}}}{1 - e^{-\frac{\theta_2}{T_2}} - \frac{\theta_2}{T_2} e^{-\frac{\theta_2}{T_2}} [1 + e^{-\frac{\theta_2}{T_2}} (1 - e^{-\frac{\theta_1}{T_1}})]}. \quad (6)$$

Коэффициент заряда конденсатора  $K$  определяется и в этом случае из условия согласования (3). Выражение для  $K$  аналогично (4):

в схеме холостого хода. Шунтирующее действие сеточной цепи и ланьнейший разряд идет так же, как в патом интервале, благодаря запариванию в.ч. генератора, прекращается стихания на сетке генератора напряжения запаривания  $E^g$ . После погасания тиратрона  $T_1$  разрядная цепь замыкается через шунтирующую цепь в течение четвертого интервала времени, который длится до полного шунтирования  $T_1$  шунтируется для разрядного тока конденсатора последователя деионизации, присоединяется в третьем интервале, обратное сопротивление тиратрона  $T_2$ , с которого пропорционально анализу. В течение Отличие в работе схемы холостого хода и наружной схемы начинается полученные той же методикой, представляются в таблице 2.

конец, последний - пять отрезок времени будет идентичен последнему интервалу работы на холостом ходу. Соответствующие каждому интервалу схемы и формулы, сопротивлением прилика и промежутка сетка-катод генераторной лампы и, на-

выражение для  $t_{01}$  теряет смысл. Это означает, что напряжение на тиратроне не пройдет через нуль и схема станет неработоспособной. Такой эффект может произойти при уменьшении времени  $t_2$ .

В этой схеме существенной является связь между временем  $t_4$  и напряжением записания в.ч. генератора  $E_g = pE$ . Приравнявая  $U_{AL}(t_4) = pE$ , находим

$$e^{-\frac{t_4}{\theta_4}} = \frac{1-p}{e^{-\frac{t_2}{\theta_2}} \left[ (1+Ke^{-\frac{t_1}{\theta_1}}) e^{-\frac{t_2}{\theta_2}} - 1 \right] - 1} \quad (9)$$

Подставляя  $e^{-\frac{t_4}{\theta_4}}$  в выражение для  $K(6)$  (таблица 2), получим относительно  $K$  квадратное уравнение, не содержащее  $t_4$ .

Как уже говорилось выше (стр.8), для устойчивой работы тиратронного триггера необходимо, чтобы время восстановления прямого напряжения на управляющем тиратроне было больше времени восстановления сеточного запирающего ( $t_0 > t_{всз}$ ). Поэтому устойчивость работы нагруженного тиратронного триггера меньше чем ненагруженного, так как, с одной стороны, благодаря небольшой величине сопротивления сеточной цепи генератора во время генерации снижается постоянная времени  $\theta_3$ , а вместе с ней и время восстановления прямого напряжения на управляющем тиратроне  $T_1$ , с другой стороны, возрастает время восстановления сеточного запирающего, т.к. во время генерации через управляющий тиратрон протекает постоянная составляющая сеточного тока генератора, которая на порядок превышает ток через тиратрон  $T_2$  (см. Приложение, рис.31) и увеличивает время деионизации.

На рис. 9 представлена осциллограмма в.ч. напряжения при нормальной работе и при сбое, связанном с незначительным увеличением скважности.

В осциллограммах в.ч. напряжения отчетливо виден выброс амплитуды, связанный с подачей импульса смещения положительной полярности на сетку генераторной лампы. Также заметно, что гашение колебаний происходит с некрутым фронтом ( $\approx 150$  мксек).

На рис. 10 показаны рассчитанные по формулам таблицы 2 величины  $U_0$ ,  $I_0$  и т.д. для различных временных взаиморасположений импульсов запуска тиратронов. Видно существенное отличие хода обратного напряжения переключающего тиратрона по сравнению со случаем холостого хода, показанного пунктиром на рис. 10.

На рис. 11 изображена осциллограмма напряжения переключющего тиристора. Совпадение с расчетными данными очень близкое. Существенное уменьшение времени  $t_{01}$  по сравнению с временем  $t_{02}$  видно из показанной на рис. 12 осциллограммы напряжения  $U_{VT}$  ненапряженного плеча триггера схемы рис. 2. Там же на осциллограмме тока, текущего через тиристор, отчетливо видны все пять временных интервалов: отсутствие тока через тиристор ( $i_T$ ); большой прямой ток, обусловленный емкостью цепи генератора ( $i_T$ ); прямой ток при шунтирующем действии сточной цепи генератора ( $i_T$ ) и после прекращения шунтирующего действия ( $i_T$ ) и, наконец, кратковременный обратный ток ( $i_T$ ). На рис. 13 показана осциллограмма того же тока и напряжения при  $E_{00} = 0$ . Осциллограмма напряжения  $U_{VT}$  на рис. 14, снятая при  $E_{00} = 0$ , показывает, что пока ток нагрузки через вентиль отсутствует, возможна работа со скважностью, несзначительно превышающей единицу ( $i_1 + i_2 \approx 1$ ).

На осциллограмм напряжения и тока управляющего тиристора при  $E_{00} \neq 0$  видна нагибающая сточного тока (рис. 15). Наличие сточного тока приводит к резкому снижению сопротивления сетка-катод генераторной лампы, к более быстрому разряду и уменьшению времени  $t_{01}$ , а также к заметному увеличению времени протекания обратного тока. Это особо отчетливо видно из сравнения осциллограмм рис. 16 а, б, в. Осциллограмма, изображенная на рис. 16 а, соответствует пределу устойчивого запитывания в.ч. генератора. Дальнейшее увеличение скважности, как видно из осциллограммы на рис. 16 б, в требует запитывания генератора при большем сточном токе; время ленинизации также возрастает. Срыв в работе генератора, происходящий при этом, хорошо виден из осциллограммы.

Повышение мощности генерации в.ч. генератора и уменьшение времени  $t_{01}$ , происходящее при увеличении скважности, облегчает срыв работы манипулятора. Для рабочих условий нашего генератора предел устойчивого запитывания имеет место при времени  $t_{01} = 125$  мксек для амплитуды управляющей сточного тока  $i_{02}$ . Незначительное увеличение скважности приводит к уменьшению времени  $t_{01}$  и к срыву работы (рис. 17 а, б).

На осциллограмме рис. 5 видна интересная особенность — спад напряжения на катоде пораскающего тиристора происходит от максимального значения сначала с меньшей постоянной времени. Так как к этому времени гаснущий тиристор уже полностью погас, эта аномалия может быть связана только с изменением внутреннего сопротивления проводящего тиристора и соотношением между его

сеточным и анодным током. Она, по-видимому, вызвана ответвлением части полного ионного тока в сеточную цепь и прекращается по исчезновении сеточной проводимости - поджигающего импульса (рис. 18). Только после этого тиратрон переходит в стационарный режим горения. Очевидно, увеличение длительности импульса положительной полярности на сетке тиратрона сказывается в некоторой мере положительно на устойчивости работы схемы.

Отмеченная особенность для нашего расчёта не существенна, поэтому будем считать, что имеются только два участка и переход от начальной точки первого к начальной точке второго происходит по линейному закону.

Примерный вид расчётных, аппроксимированных и действительных фронтов показан на рис. 19.

Величина, на которую уменьшается заряд конденсатора  $C$  за время  $t = 10$  мксек, составляет  $Q = 10^{-5}$  кул; разрядный ток практически целиком проходит через тиратроны. Порядок величины заряда, протекающего через тиратрон, совпадает с данными, известными из литературы <sup>/10/</sup> для заряда, необходимого для деионизации тиратрона.

Приведенный анализ показывает, что для существующих в настоящее время рабочих режимов в.ч. генератора имеющийся манипулятор не может обеспечить его чёткую работу в режиме непрерывной манипуляции. Простое повышение напряжения источника, питающего манипулятор, или триггерных токов не может привести к улучшению его работы (повышение мощности), т.к. при этом также возрастает и время, требуемое для восстановления сеточного запирающего. Недостатками этой схемы являются еще:

а) подача импульса положительной полярности на сетку генераторной лампы, увеличивающего интенсивность генерации в момент, непосредственно предшествующий запирающему генератора, которое этим затрудняется;

б) запаздывание момента запирающего по отношению к моменту прекращения протекания прямого тока через управляющий тиратрон. К тому же запирающее происходит со сравнительно пологим фронтом и поэтому не всегда четко фиксировано по времени.

в) при отсутствии генерации сетка в.ч. генератора не соединяется с землей. Уменьшение переключающей емкости до значения  $\approx 0,2$  мкф и ниже пригодило к сбоям в работе манипулятора из-за соответствующего уменьшения времени, когда на катоде тиратрона находится отрицательное напряжение; увеличение

этой емкости более чем по 4 мкФ значительно увеличивало время, необходимое для ее перезарядки. Из-за этого падала амплитуда приложенного обратного напряжения, а также уменьшалось время, в течение которого на катоде управляющего тиратрона поддерживалось отрицательное напряжение.

Некоторого улучшения устойчивости маннипуляции удалось добиться, когда на сетку, кроме автосмещения, получаемого за счет генерации, подавалось при- нудительное смещение за счет протекания тока триггерной схемы через сопротивление  $R_1$  (рис. 20). Эта схема, однако, не всегда в состоянии обеспе- чить работу в режиме с растяжкой пучка, к тому же из-за принудительного сме- щения она несколько снижает интенсивность возбуждения, если не менять дру- гих параметров, определяющих рабочий режим автогенератора.

Электронный вариант схемы маннипулятора, где внутреннее сопротивление электронной лампы выполняется роль гридлика, оказалась принципиально нена- дежным, поэтому ниже приведены два варианта схемы маннипулятора с ис- пользование тиратронов, проверенные в эксплуатации и обеспечивающие чет- кое запаривание в.ч. генератора со скважностью не менее 3. При таком режиме работы маннипулятора смещение, запирающее генератор, должно создаваться на сопротивлении гридлика или на его части.

3. Переходные процессы в нагруженных тиратронных триггерах с вентилями, свободными от тока нагрузки через вентиль

В триггерах, свободных от тока нагрузки через вентиль, замыкание наг- рузки, представляющей собой сеточную цепь генератора, должно происходить через активное сопротивление, которое является общим для триггера и генера- тора.

Независимость двух цепей (управляющей и управляемой схем) достигается при выполнении следующего условия: ток триггера не должен протекать через общее сопротивление, генератор заперт.

Схема триггера, для которой выполнены условия независимости управляющей и управляемой цепей, изображена на рис. 21 а. Как и в предыдущих случаях считаем, что период работы триггера начинается с момента поджига тиратрона

$T_1$ . Первый временной интервал заканчивается в момент погасания тиратрона  $T_1$ , а второй – в момент достижения напряжения запирания в.ч. генератора  $E_g$  на эквивалентном диоде, шунтирующем сопротивление  $R_4$  через сеточную цепь в.ч. генератора. Третий интервал соответствует разрядным процессам с момента прекращения шунтирующего действия сеточной цепи до момента поджига тиратрона  $T_2$ . Два последних временных интервала в периоде работы триггера совпадают с соответствующими интервалами работы триггера на холостом ходу за исключением того, что при наличии генерации в последнем интервале времени  $U_o(\infty)$  будет равно  $U_m - E_o$ , где  $E_o$  – та часть автосмещения генератора, которая падает на сопротивлении  $R_4$ .

Следует, однако, отметить, что в зависимости от величины элементов схемы отрицательное напряжение на сетке в.ч. генератора может достигнуть значения  $E_g$  еще в первом интервале, с момента загорания тиратрона  $T_1$ . В этом случае, за исключением влияния  $E_o$ , работа нагруженного триггера не будет отличаться от его работы на холостом ходу. Действительно, приведенные в таблице 3 выражения для этой схемы совпадают с соответствующими выражениями для схемы холостого хода (таблица 1), а напряжение, запирающее в.ч. генератор ( $U_{PA}$ ) с точностью до постоянной  $\frac{R_4}{R_1 + R_4}$ , по существу, совпадает с величиной  $E - U_A$  для холостого хода. Для общности анализа в табл. 3 учитывается шунтирующее действие сеточной цепи, хотя в использованной нами схеме параметры были такими, что запираение в.ч. генератора происходило в момент поджига тиратрона  $T_1$ .

Диаграммы электрических величин, характерных для данной схемы (рис.21а), нетрудно получить из аналогичных диаграмм холостого хода.

Выражения для  $K$ ,  $t_{01}$ ,  $t_{02}$ , полученные тем же методом, что и в предыдущих случаях, приведены в таблице 3.

По истечении интервала времени  $t_1$  после поджигания тиратрона  $T$  отрицательное напряжение на общем сопротивлении достигает значения  $E_{g0}$  – достаточного для возникновения генерации.

Осциллограмма амплитуды ускоряющего напряжения (рис. 22) иллюстрирует необходимость предварительного включения в.ч. генератора для получения номинальной амплитуды на частоте захвата. Достоинством схемы является четкое запираение в.ч. генератора со скважностью, стремящейся к бесконечности.

На рис. 21 в изображена схема тиратронного триггера с независимыми



Используя формулы, приведенные в таблице 4, нетрудно получить выражение для коэффициента заряда конденсатора  $K$  и времен существования обратного напряжения на тиратронах ( $T_1$  и  $T_2$ )  $t_{01}$  и  $t_{02}$ .

Трона  $T_1$ .

рапия в.ч. колебаний резко обрывается в конце интервала, в момент поджига тиратрона  $T_1$ . Искожная место генерации конденсатора имеет практически с постоянной времени  $R^2 C$ . Искожная место генерации конденсатора имеет практически с постоянной времени  $R^2 C$ . Искожная место генерации конденсатора имеет практически с постоянной времени  $R^2 C$ . Искожная место генерации конденсатора имеет практически с постоянной времени  $R^2 C$ .

В последнем интервале времени, после отключения тиратрона  $T_1$ , шунтирование амплитуды ускоряющего в.ч. напряжения. В последнем интервале времени, после отключения тиратрона  $T_1$ , шунтирование амплитуды ускоряющего в.ч. напряжения. В последнем интервале времени, после отключения тиратрона  $T_1$ , шунтирование амплитуды ускоряющего в.ч. напряжения. В последнем интервале времени, после отключения тиратрона  $T_1$ , шунтирование амплитуды ускоряющего в.ч. напряжения.

Необходимым условием четкой работы манипулятора на нагрузку является  $U_{DL} \leq E_g$ .

$$U^m = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot (10)$$

пательное напряжение  $U_{DL}$  падает, стремясь к своему стационарному значению. пательное напряжение  $U_{DL}$  падает, стремясь к своему стационарному значению. пательное напряжение  $U_{DL}$  падает, стремясь к своему стационарному значению. пательное напряжение  $U_{DL}$  падает, стремясь к своему стационарному значению.

Шунтирующее действие нагрузки полностью отсутствует и во втором интервале времени, который длится до момента поджига тиратрона  $T_2$ . По мере разряда конденсатора с постоянной времени  $\theta = C(R_1 + R_2) + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$  отрицательное напряжение лампы поступает импульт напряжения отрицательной полярности, достаточный для того, чтобы запретить генератор. Первый интервал кончается в тот момент, когда гаснет тиратрон  $T_2$ .

Анализ, проведенный для триггера (рис. 21 в) по эквивалентным схемам, со- держимся в таблице 4, в этом случае начинается с момента поджига тиратрона  $T_1$  при начальном напряжении на конденсаторе  $U^0(0) = K U^m$ . С этого момента для сеточной цепи в.ч. генератора и управляющего тиратрона, включается между цепями управляющей и управляемой частей, которая позволяет получать крутые фронты импультсов на нагрузку. В этой схеме сопротивление, влияющее общим

$$K = \frac{1 - e^{-\frac{t_4}{\theta_4}} \{ 1 - a [ 1 - e^{-\frac{t_3}{\theta_3}} [ 1 - e^{-\frac{t_2}{\theta_2}} ( 1 - e^{-\frac{t_1}{\theta_1}} ) ] ] \} + b e^{-\frac{t_3}{\theta_3}} ( 1 - e^{-\frac{t_2}{\theta_2}} )}{1 - e^{-\sum_{i=1}^3 \frac{t_i}{\theta_i}}} \quad (11)$$

$$t_{01} = \theta_4 \ln \left\{ 1 + b e^{-\frac{t_3}{\theta_3}} ( 1 - e^{-\frac{t_2}{\theta_2}} ) - K e^{-\sum_{i=1}^3 \frac{t_i}{\theta_i}} - a [ 1 - e^{-\frac{t_3}{\theta_3}} ( 1 - e^{-\frac{t_2}{\theta_2}} ( 1 - e^{-\frac{t_1}{\theta_1}} ) ) ] \right\} \quad (12)$$

$$t_{02} = \theta_2 \ln \left( \frac{a + b}{b} + \frac{k - a}{b} e^{-\frac{t_1}{\theta_1}} \right); \quad (13)$$

где

$$a = \frac{R_2 + R_T}{R_1 + R_2 + R_T} - \frac{R_0}{R_0 + R_3};$$

$$b = \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_T}.$$

и

Для конкретных параметров схемы, приведенных в Приложении, произведен расчёт величин, определенных в таблице 4. Результаты приведены на рис. 23. На рис. 24а,б приведены осциллограммы напряжения  $U_{AL}$  и  $U_{DL}$  соответственно. Совпадение расчётных и экспериментальных данных хорошее. На рис. 25 показаны осциллограммы напряжения  $U_{DL}$  при наличии нагрузки. Из сравнения рис. 24б и 25 видно, что благодаря независимости переключающей и нагрузочной цепей, импульс, запирающий в.ч. генератор, остается неизменным. На рис. 26 показана осциллограмма в.ч. напряжения, полученная при большой скважности импульса в.ч. генератора в формированном режиме.

Учет влияния обратной проводимости тиратронов позволил объяснить наличие и оценить величину выбросов в полученных осциллограммах.

ветствия с табл. 5, устремить к  $\infty$ , а последовательные приравнять 0 и изменить индексы в соответствии с конкретной схемой эквивалентных параллельных сопротивлений. Соответствующие эквивалентные схемы приведены в табл. 6. Для перехода симметрии тиратрона  $T^1$ ; 5 - прекращение шунтирующего действия сопротивления  $R_1$ , жиком тиратрона  $T^2$ ; 4 - прекращением шунтирующего действия обратной проволы тиратрона  $T^1$ ; 2 - прекращением шунтирующего действия сопротивления  $R_2$ ; 3 - подделаемые характерными моментами его работы, а именно: 1 - полжиком тиратрона  $T^1$ . Первый период нагруженного тиратра разделен на временные интервалы, начало периода совмещено с моментом зажигания управляющего тиратрона чивость его работы.

либо вносит перераспределение напряжений, практически не влияющее на устойчивость тиратрона, т.к. он протекает либо независимо от тока тиратра, этого тока не учитывалось, т.к. он протекает либо независимо от тока тиратра, через тиратрон и тем самым увеличивает  $I_{вса}$ . В остальных случаях влияние нагрузки тока напряжения, приложенного к соответствующему эквивалентному от напряженности напряжения, приложенного к соответствующему эквивалентному патерной полнрности. Проводимость нагрузки будет изменяться в зависимости между точками, где получается полезный сигнал - импульс напряжения отри- нагрузку тиратра - лод с односторонней проводимостью следует подключать Обобщенная схема должна быть составлена следующим образом (рис. 27):

новой схемы, характеризующаяся односторонней проводимостью.

с вентилярными элементами, нагрузкой для которых является сеточная цепь ламк выводу, что возможен единый подход ко всем рассмотренным схемам тиратров Анализирова результаты, полученные в предыдущих параграфах, можно приати вентилярными элементами

4. Обобщенная схема нагруженного тиратров с

запирания  $I_{вса}$  значения  $\frac{R_1 + R_2}{R_2}$ , при котором еще возможна устойчивая работа, определяется менами  $t_{01}$  и  $t_{02}$ , которые должны превышать время восстановления сеточного шества, и оба тиратрона остаются постоянно в проводящем состоянии. Предельное Отметим, что при возрастании  $\frac{R_1 + R_2}{R_2}$  устойчивая работа тиратра напу-

Полученные, как обычно, значения для  $K$ ,  $t_{01}$ ,  $t_{02}$ ,  $t_4$  равны соответственно:

$$K = \frac{1 - e^{-\frac{t_3}{\theta_3} - \frac{t_4}{\theta_4}} \{1 - a[1 - e^{-\frac{t_3}{\theta_3}} [1 - e^{-\frac{t_2}{\theta_2}} (1 - e^{-\frac{t_1}{\theta_1}})]]\} + be^{-\frac{t_3}{\theta_3}} (1 - e^{-\frac{t_2}{\theta_2}})}{1 - e^{-\sum_{i=1}^3 \frac{t_i}{\theta_i}}} \quad (14)$$

$$t_{01} = \theta_4 \ln \left\{ 1 + be^{-\frac{t_3}{\theta_3}} (1 - e^{-\frac{t_2}{\theta_2}}) - Ke^{-\sum_{i=1}^3 \frac{t_i}{\theta_i}} - a[1 - e^{-\frac{t_3}{\theta_3}} [1 - e^{-\frac{t_2}{\theta_2}} (1 - e^{-\frac{t_1}{\theta_1}})]] \right\} \quad (15)$$

$$t_{02} = \theta_2 \ln \left[ \frac{a + b}{b} + \frac{K - a}{b} e^{-\frac{t_1}{\theta_1}} \right] \quad (16)$$

$$t_4 = \theta_4 \ln \left\{ \frac{1}{1 - p} [1 - a[1 - e^{-\frac{t_3}{\theta_3}} (1 - e^{-\frac{t_2}{\theta_2}} (1 - e^{-\frac{t_1}{\theta_1}}))] + be^{-\frac{t_3}{\theta_3}} (1 - e^{-\frac{t_2}{\theta_2}})] + e^{-\sum_{i=1}^3 \frac{t_i}{\theta_i}} \left( e^{-\frac{t_3}{\theta_3}} - \frac{1}{1 - p} \right) \right\} \quad (17)$$

где

$$p = \frac{E_3}{E}; \quad a = \frac{R_2 + R_T}{R_1 + R_2 + R_4 + R_T} - \frac{R_0}{R_0 + R_3}; \quad b = \frac{R_1 + R_4}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}.$$

В качестве иллюстрации обобщенной схемы в таблице 4 приведены расчётные формулы и графики характерных величин для нагруженного триггера, схема которого показана на рис. 27, г.

## 5. Заключение

Проведен анализ причин неустойчивой работы первоначально спроектирован-

Из представленной на рис. 28 осциллограммы обратного тока  $i_{10}/10$ , а также из осциллограмм, приведенных на рис. 29, можно примерно оценить величину обратного сопротивления гашущего тиратрона и время существования его

### П р и л о ж е н и е

вентлями.

Реагуяты пригодны для расчёта триггерных схем с полупроводниковыми формулы, позволяющие перейти к любой конкретной схеме.

Для обобщенной схемы полученны расчётные формулы, позволяющие перейти к любой конкретной схеме тиратронного триггера, на-  
Была сделана попытка анализа работы обобщенной схемы тиратронного триггера, на-  
токов через тиратрон.

проводимости тиратронов и объясняющий наличие выбросов в осциллограммах  
Метод технического расчёта такого триггера, учитывающий влияние обратной  
Ющие чёткую работу тиратронного триггера с нелинейной нагрузкой и предложен  
В результате проведенного анализа были определены условия, обеспечива-  
напряжения.

сторонней проводимостью, зависящей от полноты приложенного к ветвям  
при рассмотрении линейных цепей  $i_{10}/10$ , на цепи с ветвями, обладающими одно-  
жена методика, позволяющая расширить применимость методов, используемых  
иничи сопротивления прилики и возрастанием сетевого тока. В работе предло-  
Неустойчивость возрастает с увеличением скважности, уменьшением вели-  
няет запаривание генератора.  
иеро тиратрона, возникает и на сетках генераторных ламп, что также затруд-  
через тиратрон. Положительный импульс, необходимый для гашения управляю-  
ния, которое увеличивается вследствие протекания сетевого тока генератора  
тате это время становится меньше времени восстановления сетевого запара-  
время восстановления прямого напряжения на управляющем тиратроне. В резуль-  
лучшим действием промежутка сетка-катод в.ч. генератора, которое уменьшается  
Чёткая работа тиратронного триггера в этих условиях выражалась шунти-  
скважности, превышающей 2.

и сетевого тока в.ч. генератора по 60-80 кВ и 4-5 а, соответственно) при  
ниях к рабочим режимам в.ч. генератора (увеличение потребляемой мощности  
ноту манипулятора синхросциклофона на 680 Мав при повышенных требова-  
/1/

обратной проводимости. Влияние обратной проводимости на работу схемы может сказываться тем сильнее, чем она ближе по величине к проводимости в прямом направлении. Во всяком случае в расчётах с большим резервом можно считать, что для рассматриваемых нами тиратронов  $R_T \leq R_0 \leq R$ , где  $R$  — сопротивление плеча триггера, а время протекания обратного тока не превышает 10 мксек, причём для ртутных тиратронов это время меньше.

На рис. 30 показана зависимость времени восстановлений сеточного запираания от геометрии сетки для разных токов, протекающих через тиратрон, а на рис. 31 — зависимость предельной рабочей частоты тиратрона от величины сеточного смещения. В среднем время восстановления сеточного запираания составляет 150+300 мксек<sup>/11/</sup>.

На рис. 3 представлена осциллограмма, показывающая длительность времени задержки между моментом подачи поджигающего импульса на сетку тиратрона и моментом загорания тиратрона. Как видно из осциллограммы, эта задержка составляет 50 + 100 мксек.

Ранее разработанный манипулятор<sup>/7/</sup> собран на тиратронах ТГ1- 2,5/4, для которых падение напряжения в прямом направлении составляет 20 в. Сопротивление  $R = 5$  ком,  $C = 0,5$  мкф. Частота модуляции  $F = 112$  гц, напряжение источника равно  $E = 1800$  в, хотя первоначально манипулятор эксплуатировался при  $E = 1200$  в и  $F = 80$  гц.

На рис. 32 показана зависимость напряжения запираания в.ч. генератора  $E_g$  от анодного напряжения  $E_a$ , а также зависимость составляющей сеточного тока  $I_o$  от  $E_a$ <sup>/13/</sup>.

Для схемы манипулятора с тиратронами ТР - 5/2 имеем  $C = 3$  мкф,  $R_1 = 230$  ом,  $R_2 = 180$  ом,  $R_3 = 440$  ом,  $R_T = 50$  ом.

На рис. 33 показана характеристика тиристора<sup>/14/</sup>, из которой можно оценить сопротивления в прямом и обратном направлениях. К сожалению, мы не располагаем данными о времени восстановления запирающего действия управляющего электрода.

Следует отметить, что сопротивление вентилях в прямом направлении  $R_{II}$ , строго к говоря, нелинейно. В случае, когда нужна строгость результатов, вместо  $R_{II}$  следует брать  $\frac{\Delta U}{\Delta I}$ , но ввиду малости сопротивления  $R_{II}$  в большинстве практических случаев это не нужно.

1. Д.В.Ефремов, М.Г.Мешеряков, А.Л.Мини и др. "Шестиметровый синхротрон и др." Атомная энергия №4, стр.5-12, 1956.
2. В.И.Данилов, И.Б.Енчевич, Э.А.Полферов, А.Н.Сафонов. "Зависимость интенсивности от ускоряющего напряжения в синхротроне ОИЯИ." Атомная энергия, т.21, вып. 5, стр. 402-404, 1966.
3. В.И.Данилов, И.Б.Енчевич, В.И.Замолодчиков, Б.Н.Марченко и др. "Повышение интенсивности пучка протонов в шестиметровом фазотроне ОИЯИ", Атомная энергия, т.16, в.1, с 9-11: 1964.
4. В.И.Данилов, И.Б.Енчевич, Е.И.Розанова, В.И.Смирнов, Т.Н.Томплина. "Устройство системы растяжки пучка протонов синхротрона на 680 МэВ". Препринт ОИЯИ Р-2281, Дубна, 1965; В.И.Данилов, И.Б.Енчевич, В.И.Замолодчиков, Э.А.Полферов и др. Авторское свидетельство № 175586 от 14.08.1965г. с приоритетом от 25.11.1963 г.
5. В.И.Данилов, И.Б.Енчевич, М.М.Кулюкин, Э.А.Полферов, Т.Н.Томплина. "Накопление пучка в синхротроне на 680 МэВ". Препринт ОИЯИ, Р-2811, Дубна, 1966.
6. В.И.Данилов, И.Б.Енчевич, Е.И.Розанов, Т.Н.Томплина, А.В.Шестов. "Управление синхротроном на 680 МэВ". ПТЭ №3 с 19-22, 1966.
7. А.Л.Мини, И.Х.Невяжский, Б.И.Поляков. "Некоторые особенности и основные данные высокочастотной системы шестиметрового синхротрона". Радио-техника и электроника №7, стр. 3-12, 1956.
8. Я.С.Ицхоки. Импульсные устройства. Изд. Советское радио, Москва, 1959.
9. А.М.Бонч-Бруевич. "Радиоэлектроника в экспериментальной физике." Изд. "Наука". Москва, 1966.
10. И.Л.Карганов, "Электронные и конные преобразователи". ч.11, Госэнергоиздат, М.-Л., 1955.
11. Электротехнический справочник, т.11, Издательство "Энергия", Москва-Ленинград, 1964.
12. В.Г.Зинов, С.В.Мелвель, Е.Б.Озеров. Временная структура пучков, части, выделенных из синхротрона ОИЯИ. Атомная энергия, т.21, вып. 6, XII -1966 г.

13. Б.С.Агафонов. Расчет эксплуатационных режимов генераторных ламп. Госэнергоиздат, 1962.
14. Библиотека по автоматике, выпуск 109 под редакцией М.Г.Чиликина. Издательство "Энергия", Москва-Ленинград, 1964.

Рукопись поступила в издательский отдел

22 января 1968 г.



Средними показаво выбранное направление тока. Обозначения:  $T_1 = t_1 + t_2 + t_3 + t_4$  - период работы триггера,  $R_{ox}$  - эквивалентное сопротивление ветви, изображенных в графе 2.  $R_{ov}$  - эквивалентное сопротивление ветви "А" той же схемы  $U_m = E - \Delta U = I_0 R_3$ . где  $E$  - напряжение источника питания триггера,  $\Delta U$  - падение на-пряжения на проводящем тиратроне.  $I_0$  - стационарный ток, теку-щий через проводящий тиратрон (для схем, изображенных в графе 1).  $K$  - коэффициент зарядки конденсатора,  $t_{01}$  - время, необходимое для того, чтобы на пластине "А" конденсатора  $C$  разность потен-циалов относительно земли изменилась от величины  $KU_m$  до 0. По истечении этого времени тиратрон  $T_1$  может снова проводить в прямом направлении, если  $t_{01} < t_2$  или если на  $T_1$  подать положительный импульс,  $t_{02}$  - то же для пластины "В" конденсатора  $C$  и соответ-ственно для тиратрона  $T_2$ .

$$K = \frac{1 - e^{-\frac{\theta_1}{T_1} (1 + \frac{\theta_2}{T_2} + \frac{\theta_3}{T_3} + \frac{\theta_4}{T_4})}}{1 - e^{-\frac{\theta_1}{T_1} (1 + Ke)} - e^{-\frac{\theta_2}{T_2} (1 + Ke)} - e^{-\frac{\theta_3}{T_3} (1 + Ke)} - e^{-\frac{\theta_4}{T_4} (1 + Ke)}} \cdot t_{02} = \theta_2 \theta_1 \ln(1 + Ke)$$

№	Литера	Время	№	Литера	Время
1	Цепь	постоянная	1	Цепь	20 тока
2	Цепь	переменная	20	ток.	
3	Сопоставление параметров между двумя цепями		3	Сопоставление параметров между двумя цепями	
4	$\theta \cdot C \cdot R_{ox}$	$C [R_3 + R_0 + R_{ov}]$	4	$\theta \cdot C \cdot R_{ox}$	$C [R_3 + R_0 + R_{ov}]$
5	$R_{ov}$	$R_{ov} = R_1 + R_2$	5	$R_{ov}$	$R_{ov} = R_1 + R_2$
6	$\frac{U_m}{U_c(t)}$	$K$	6	$\frac{U_m}{U_c(t)}$	$A_1$
7	$\frac{U_m}{U_c(t)}$	0	7	$\frac{U_m}{U_c(t)}$	$A_2$
8	$\frac{U_m}{U_c(t)}$	$Ke^{-\frac{\theta_1}{T_1} t}$	8	$\frac{U_m}{U_c(t)}$	$A_2 e^{-\frac{\theta_1}{T_1} t}$
9	$A$	$A_1 = \frac{U_c(t_1)}{U_m}$	9	$A$	$A_2 = \frac{U_c(t_2)}{U_m}$
10	$\frac{J_c(t)}{J_0}$	$-\frac{C R_3}{K e^{-\frac{\theta_1}{T_1} t}} [1 + A] e^{-\frac{\theta_2}{T_2} t}$	10	$\frac{J_c(t)}{J_0}$	$\frac{C R_3}{K R_2} [1 - A] e^{-\frac{\theta_2}{T_2} t}$
11	$\frac{U_m}{U_c(t)}$	$\frac{J_0}{R_3} \frac{R_{ov}}{R_2}$	11	$\frac{U_m}{U_c(t)}$	$\frac{J_0}{R_3} \frac{R_{ov}}{R_2}$
12	$\frac{U_m}{U_c(t)}$	$[-1 - \frac{J_0}{R_3}]$	12	$\frac{U_m}{U_c(t)}$	$[-1 - \frac{J_0}{R_3}]$

Таблица 1

Таблица 2

№№ п/п	Интервалы времени Параметры схемы	i				
		1 $0 < t < t_1$	2 $0 < t < t_2$	3 $0 < t < t_3$	4 $0 < t < t_4$	5 $0 < t < t_5$
1	Цепь постоянного тока.					
2	Цепь переменного тока.					
3	Соотношение между параметрами триггера.	$R_7 = R_8 = 0,01 R_1$ $R_1 = R_3$	$R_7 \ll R_1$ ; $R_1 = R_3$ $R_8 \rightarrow \infty$	$R_7 = R_8 = 0,01 R_1$ $R_1 = R_3$ ; $R_{2p} = 0,1 R_1$	$R_7 = 0,01 R_1$ ; $R_8 \rightarrow \infty$ $R_1 = R_3$ ; $R_{2p} = 0,1 R_1$	$R_7 = 0,01 R_1$ ; $R_8 = R_3$ $R_8 \rightarrow \infty$ ; $R_{2p} \rightarrow \infty$
4	$\theta = CR_{сх}$	$C \left[ \frac{R_3 R_7}{R_8 + R_7} + R_{0e1} \right]$	$C \left[ R_3 + R_{0e2} \right]$	$C \left[ \frac{R_3 R_7}{R_3 + R_7} + R_{0e3} \right]$	$C \left[ \frac{R_3 R_7}{R_3 + R_7} + R_{0e4} \right]$	$C \left[ \frac{R_3 R_7}{R_3 + R_7} + R_{0e5} \right]$
5	$R_{0e}$	$R_{0e1} = \frac{R_7 R_1}{R_7 + R_1}$	$R_{0e2} = \frac{R_1 R_7}{R_7 + R_1}$	$R_{0e3} = \frac{R_8 R_{2p}}{R_8 + R_{2p} + \frac{R_4 R_{2p}}{R_1}}$	$R_{0e4} = \frac{R_1 R_{2p}}{R_1 + R_{2p}}$	$R_{0e5} = R_1$
6	$\frac{U_c(0)}{U_m}$	K	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$
7	$\frac{U_c(\infty)}{U_m}$	0	-1	0	1	1
8	$\frac{U_c(t)}{U_m}$	$K e^{-\frac{t}{\theta_1}}$	$(A_1 + 1) e^{-\frac{t}{\theta_2}} - 1$	$A_2 e^{-\frac{t}{\theta_3}}$	$(A_3 - 1) e^{-\frac{t}{\theta_4}} + 1$	$(A_4 - 1) e^{-\frac{t}{\theta_5}} + 1$
9	A	$A_1 = \frac{U_c(t_1)}{U_m}$	$A_2 = \frac{U_c(t_2)}{U_m}$	$A_3 = \frac{U_c(t_3)}{U_m}$	$A_4 = \frac{U_c(t_4)}{U_m}$	$K = \frac{U_c(t_5)}{U_m} = A_5$
10	$\frac{J_{c1}(t)}{J_0}$	$-\frac{CR_3}{\theta_1} K e^{-\frac{t}{\theta_1}}$	$-\frac{CR_3}{\theta_2} (1 + A_1) e^{-\frac{t}{\theta_2}}$	$\frac{CR_3}{\theta_3} [A_2] e^{-\frac{t}{\theta_3}}$	$\frac{CR_3}{\theta_4} (1 - A_3) e^{-\frac{t}{\theta_4}}$	$\frac{CR_3}{\theta_5} (1 - A_4) e^{-\frac{t}{\theta_5}}$
11	$\frac{U_{AL}(t)}{U_m}$	$\frac{J_{c1}}{J_0} \frac{R_{0e1}}{R_3}$	$\frac{J_{c2}}{J_0} \frac{R_{0e2}}{R_3}$	$\frac{J_{c3}}{J_0} \frac{R_{0e3}}{R_3}$	$-1 + \frac{J_{c4}}{J_0} \frac{R_{0e4}}{R_3}$	$-1 + \frac{J_{c5}}{J_0} \frac{R_{0e5}}{R_3}$
12	$\frac{U_{BL}(t)}{U_m}$	$- \left[ 1 - \frac{J_{c1}}{J_0} \right]$	$-1 - \frac{J_{c2}}{J_0}$	$- \left[ 1 - \frac{J_{c3}}{J_0} \right]$	$\sim 0,01$	$\sim 0,01$

$$K = \frac{1 + e^{-\frac{t_1}{\theta_1} - \frac{t_2}{\theta_2}} \left[ 1 + e^{-\frac{t_1}{\theta_1}} \left( 1 - e^{-\frac{t_2}{\theta_2}} \right) \right]}{1 - e^{-\frac{t_1}{\theta_1} - \frac{t_2}{\theta_2}}}; \quad t_{01} = \theta_4 \ln \left[ 1 + e^{-\frac{t_1}{\theta_4}} \left( 1 - e^{-\frac{t_2}{\theta_4}} \right) - K e^{-\frac{t_1}{\theta_1} - \frac{t_2}{\theta_2} - \frac{t_3}{\theta_3}} \right]$$

$$t_{02} = \theta_2 \ln \left[ 1 + K e^{-\frac{t_1}{\theta_1}} \right]; \quad t_4 = \theta_4 \ln \left\{ \frac{1}{1 - \rho} \left[ 1 + e^{-\frac{t_1}{\theta_1}} \left( 1 - e^{-\frac{t_2}{\theta_2}} \right) \right] + e^{-\frac{t_1}{\theta_1} - \frac{t_2}{\theta_2} - \frac{t_3}{\theta_3}} \left( e^{-\frac{t_4}{\theta_4}} - \frac{1}{1 - \rho} \right) \right\}$$

$R_{0e1}, R_{0e2}, U_m, K, t_{01}$  и  $t_{02}$  — соответствуют обозначениям таблицы 1.  $t_4$  — время, необходимое для того, чтобы на пластине А конденсатора С разность потенциалов относительно земли изменилась от значения  $K U_m$  до  $-E_2 - E_3$  — потенциал сеточного запирающего генераторной лампы.

Таблица 3

№	Интервал параметров	Цепь		Соединение	4	3	2	1
		переменная	постоянная					
1	$0 \leq t \leq t_1$			Цепь между парами схем	$R_T = R_0 < 0,1 R_3$	$R_T \leq R_3; R_1 = R_3$	$R_T \leq R_3; R_1 = R_3$	$R_T = R_0 < 0,1 R_3$
2	$0 < t < t_2$			Соединение между парами схем	$R_T = \infty; R_1 = 0,5 R_3$	$R_T = \infty; R_1 = 0,5 R_3$	$R_T = \infty; R_1 = 0,5 R_3$	$R_T = \infty; R_1 = 0,5 R_3$
3	$0 < t < t_3$			Цепь между парами схем	$R_{0e2} = R_0(R_1 + R_2)$	$R_{0e2} = R_0 + R_1 + R_2$	$R_{0e2} = R_0 + R_1 + R_2$	$R_{0e2} = R_0(R_1 + R_2)$
4	$0 < t < t_4$			Цепь между парами схем	$R_{0e2} = R_0 + R_1 + R_2$	$R_{0e2} = R_0 + R_1 + R_2$	$R_{0e2} = R_0 + R_1 + R_2$	$R_{0e2} = R_0 + R_1 + R_2$

$$f = \frac{R_1 + R_2 + R_3 + R_T}{R_2 + R_3 + R_4 + R_T} \quad ; \quad 1 - q = \frac{R_2 + R_3 + R_4 + R_{0e2}}{R_2 + R_3 + R_4 + R_T} \quad ; \quad 1 - e = \frac{R_2 + R_3 + R_4 + R_{0e2}}{R_2 + R_3 + R_4 + R_T}$$

$$K = \frac{1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \left[ 1 + e^{-\frac{t}{\tau_2}} \left( 1 + K e^{-\frac{t}{\tau_3}} \right) \right]}{1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \left[ 1 + e^{-\frac{t}{\tau_2}} \left( 1 + K e^{-\frac{t}{\tau_3}} \right) \right]}$$

$\tau_1, \tau_2, \tau_3$  - коэффициенты, введенные для упрощения выражений в графе 13.

Таблица 4

п/п	Интервалы времени Параметры схемы	1	2	3	4
		$0 < t < t_1$	$0 < t < t_2$	$0 < t < t_3$	$0 < t < t_4$
1	Цепь постоянного тока				
2	Цепь переменного тока				
3	Соотношение между параметрами триггера	$R_7 = R_0 \approx 0,1 R_3$ $R_1 \approx R_2 \approx 0,5 R_3$	$R_7 \ll R_3$ ; $R_0 \rightarrow \infty$ $R_1 \approx R_2 \approx 0,5 R_3$	$R_7 = R_0 \approx 0,1 R_3$ $R_1 \approx R_2 \approx 0,5 R_3$	$R_7 \ll R_3$ ; $R_0 \rightarrow \infty$ $R_1 \approx R_2 \approx 0,5 R_3$
4	$\theta = CR_{сх}$	$C \left[ \frac{R_2}{R_3 + R_0} + R_{oe1} \right]$	$C \left[ R_3 + R_{oe2} \right]$	$C \left[ \frac{R_2}{R_3 + R_7} + R_{oe3} \right]$	$C \left[ \frac{R_2}{R_3 + R_7} + R_{oe4} \right]$
5	$R_{oe}$	$\frac{R_1 (R_2 + R_7)}{R_1 + R_2 + R_7}$	$\frac{R_1 (R_2 + R_7)}{R_1 + R_2 + R_7}$	$\frac{R_1 (R_0 + R_2 + R_{ep})}{R_1 + R_0 + R_2 + R_{ep}}$	$R_{oe4} = R_1$
6	$\frac{U_C(0)}{U_m}$	$\kappa$	$A_1$	$A_2$	$A_3$
7	$\frac{U_C(\infty)}{U_m}$	$a$	$-b$	$a$	$1$
8	$\frac{U_C(t)}{U_m}$	$a(1 - e^{-\frac{t}{\theta}}) + \kappa e^{-\frac{t}{\theta}}$	$(A_1 + b)e^{-\frac{t}{\theta_2}} - b$	$(A_2 - a)e^{-\frac{t}{\theta_3}} + a$	$(A_3 - 1)e^{-\frac{t}{\theta_4}} + 1$
9	$A$	$A_1 = \frac{U_C(t_1)}{U_m}$	$A_2 = \frac{U_C(t_2)}{U_m}$	$A_3 = \frac{U_C(t_3)}{U_m}$	$\kappa = \frac{U_C(t_4)}{U_m} = A_4$
10	$\frac{J_{c1}(t)}{J_0}$	$-\frac{CR_3}{\theta_1} [\kappa - a] e^{-\frac{t}{\theta_1}}$	$-\frac{CR_3}{\theta_2} [A_1 + 1] e^{-\frac{t}{\theta_2}}$	$\frac{CR_3}{\theta_3} [a - A_2] e^{-\frac{t}{\theta_3}}$	$\frac{CR_3}{\theta_4} [1 - A_3] e^{-\frac{t}{\theta_4}}$
11	$\frac{U_{AL}}{U_m}$	$-(1-b) \frac{J_{c1} R_{oe1}}{J_0 R_3}$	$-(1-b) + \frac{J_{c2} R_{oe2}}{J_0 R_3}$	$-(1-b) + \frac{J_{c3} R_{oe3}}{J_0 R_3}$	$-1 + \frac{J_{c4} R_{oe4}}{J_0 R_3}$
12	$\frac{U_{BL}}{U_m}$	$-(b-a) \left(1 + \frac{J_{c1}}{J_0}\right)$	$-1 - \frac{J_{c2}}{J_0}$	$-(b-a) \left(1 - \frac{J_{c3}}{J_0}\right)$	$0,01$
13	$\frac{U_{DL}}{U_m}$	$d + q \frac{J_{c1} R_{oe1}}{J_0 R_3}$	$-d - q \frac{J_{c2} R_{oe2}}{J_0 R_3}$	$-d + q \frac{J_{c3} R_{oe3}}{J_0 R_3}$	$0$

$$a = \frac{R_2 + R_7}{R_1 + R_2 + R_7} \frac{R_0}{R_0 + R_3}; \quad b = \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_7}; \quad d = \frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_7}; \quad q = \frac{R_2}{R_2 + R_7};$$

$$\kappa = \frac{1 - e^{-\frac{t_1}{\theta_1}} \left\{ 1 - a \left[ 1 - e^{-\frac{t_1}{\theta_2}} \left( 1 - e^{-\frac{t_1}{\theta_3}} \right) \right] + b e^{-\frac{t_1}{\theta_2}} \left( 1 - e^{-\frac{t_1}{\theta_3}} \right) \right\}}{1 - e^{-\frac{t_1}{\theta_1}}}$$

$$t_{oz} = \theta_2 \ln \left( \frac{a+b}{b} + \frac{\kappa-a}{b} e^{-\frac{t_1}{\theta_1}} \right); \quad t_{oi} = \theta_4 \ln \left\{ 1 + b e^{-\frac{t_1}{\theta_2}} \left( 1 - e^{-\frac{t_1}{\theta_3}} \right) - \kappa e^{-\frac{t_1}{\theta_1}} - a \left[ 1 - e^{-\frac{t_1}{\theta_2}} \left( 1 - e^{-\frac{t_1}{\theta_3}} \right) \right] \right\}$$

$a, b, d, q$  - коэффициенты, введенные для упрощения выражений в графах 8-13.

$$p = \frac{E}{L}$$

коэффициенты, введенные для упрощения выражений в графиках 7-15

$\Gamma = \Gamma_1 + \Gamma_2 + \Gamma_3 + \Gamma_4 + \Gamma_5$  - период работы триггера.  $R_{ax}, R_{om}, K, \tau_{01}, \tau_{02}$  - соответствуют обозначениям таблицы 1.

$$K = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3} [1 - \frac{R_1 R_2}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3} (1 - \frac{R_1 R_2}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3})] + \dots$$

$$q = \frac{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3} \dots$$

$$h = \frac{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3} \dots$$

$$f = \frac{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3} \dots$$

$$d = \frac{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3} \dots$$

$$a = \frac{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3} \dots$$

5		$R_{om} = R_1 + R_2$ $R_{ax} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5$	$\Gamma = \tau_{01} + \tau_{02}$
4		$R_{om} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5$ $R_{ax} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5$	$\Gamma = \tau_{01} + \tau_{02}$
3		$R_{om} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5$ $R_{ax} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5$	$\Gamma = \tau_{01} + \tau_{02}$
2		$R_{om} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5$ $R_{ax} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5$	$\Gamma = \tau_{01} + \tau_{02}$
1		$R_{om} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5$ $R_{ax} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5$	$\Gamma = \tau_{01} + \tau_{02}$

Таблица 5

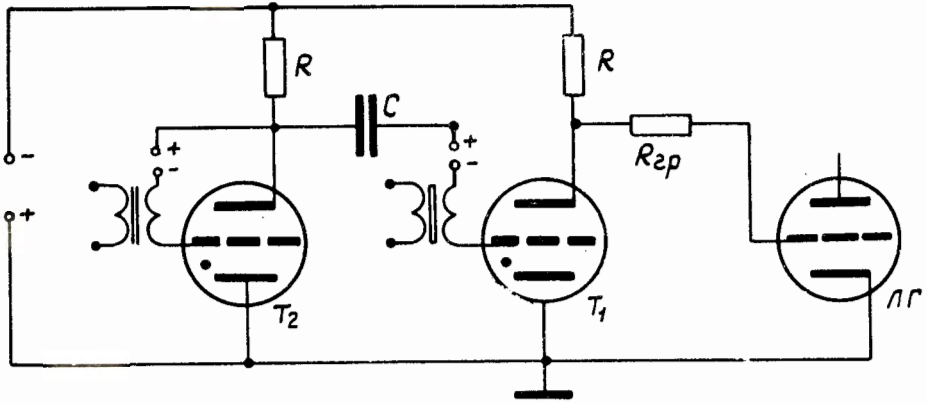


Рис.1. Принципиальная схема тиратронного манипулятора и сеточной цепи в.ч. генератора.

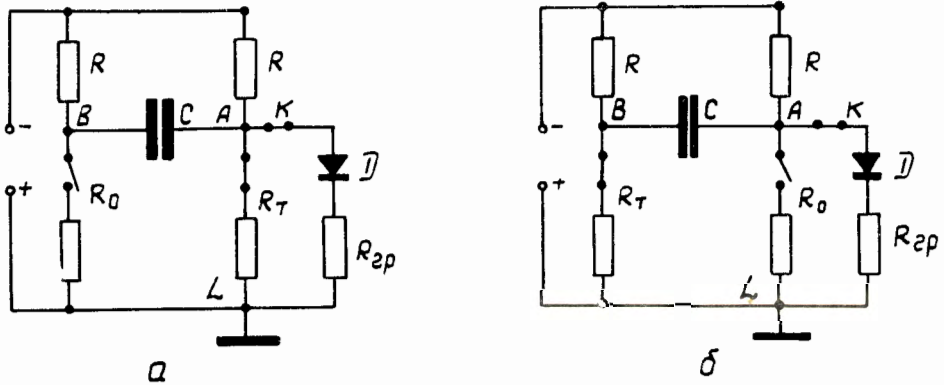


Рис.2. Эквивалентная схема тиратронного манипулятора для моментов зажигания тиратронов: а) нагруженного; б) ненагруженного.  $R_T$ ,  $R_0$  — сопротивления тиратрона в прямом и обратном направлениях.

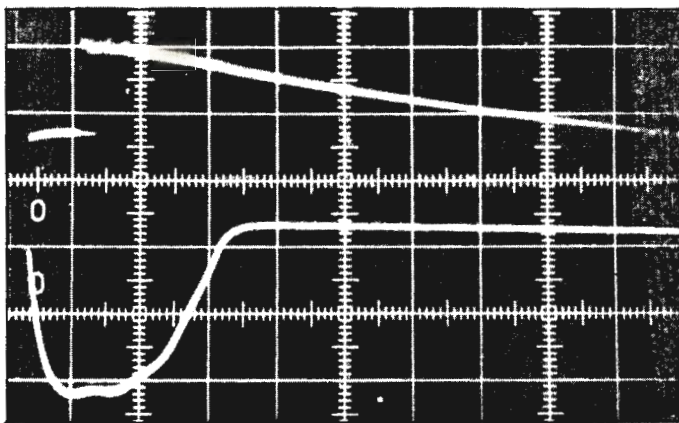


Рис.3. Осциллограмма напряжения на катоде (верхний луч) ненагруженного плеча триггера, на нижнем луче - импульс, включающий манипулятор. Развертка 100 мксек/см. Отчетливо видна задержка между моментом подачи включающего импульса и появлением обратного напряжения на катоде тиратрона ( $\approx 70$  мксек).

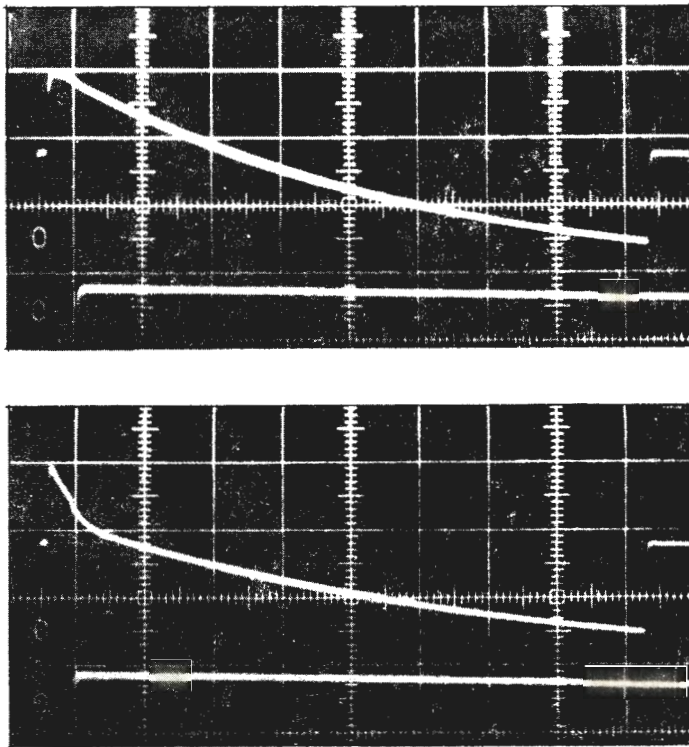


Рис.4. Осциллограммы напряжения на катодах ненагруженной (а) и нагруженной (б) ветви триггера; на нижних лучах - импульсы, запускающие манипулятор и развертку (виден только задний фронт). Развертка 500 мксек/см. Из сравнения фронтов осциллограмм рис.3 и 4 видно, что в момент переключения на загорающемся тиратроне устанавливается примерно половина прямого напряжения, существовавшего перед этим на катоде; на погасающем - примерно половина запирающего напряжения. По величине этих напряжений можно судить о приблизительном равенстве прямого и обратного сопротивления в первый момент процесса переключения. В течение короткого интервала времени, следующего за этим процессом, обратное напряжение достигает максимального значения, а прямое - напряжения горения.



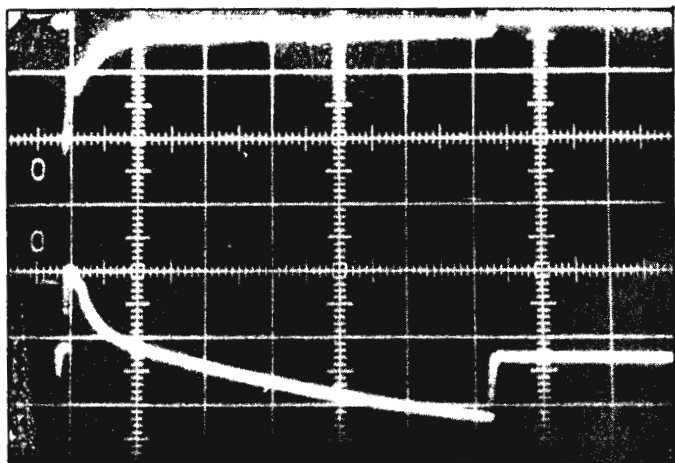


Рис.5. Осциллограмма прямого тока через тиратрон ненагруженного плеча триггера (верхний луч) и напряжения на катоде тиратрона нагруженного плеча триггера. Развертка 500 мксек/см. Видно, что выброс тока через тиратрон в момент его включения превышает на порядок стационарный ток через горящий тиратрон.

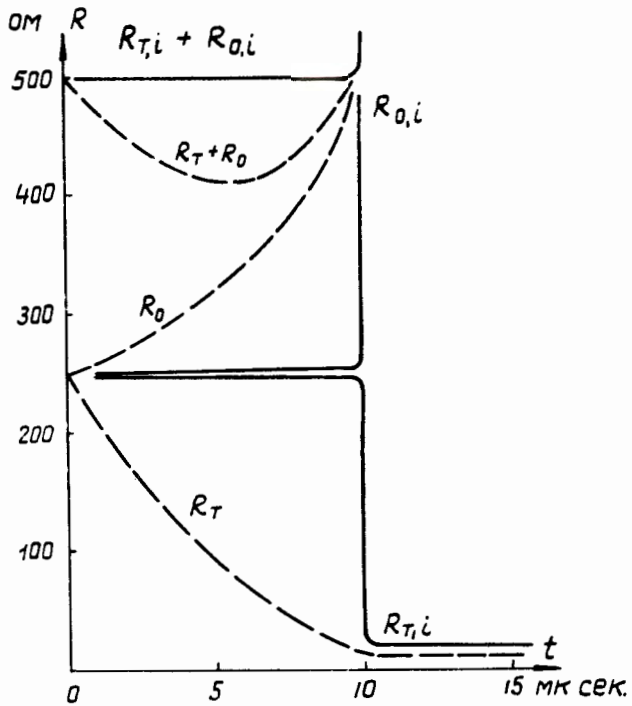


Рис.6. Графики реального и идеализированного (с индексом  $i$ ) прямого  $R_T$  и обратного  $R_0$  сопротивлений, время переключения порядка 10 мксек. Сплошной линией изображены идеализированные сопротивления, пунктирной - реальные.

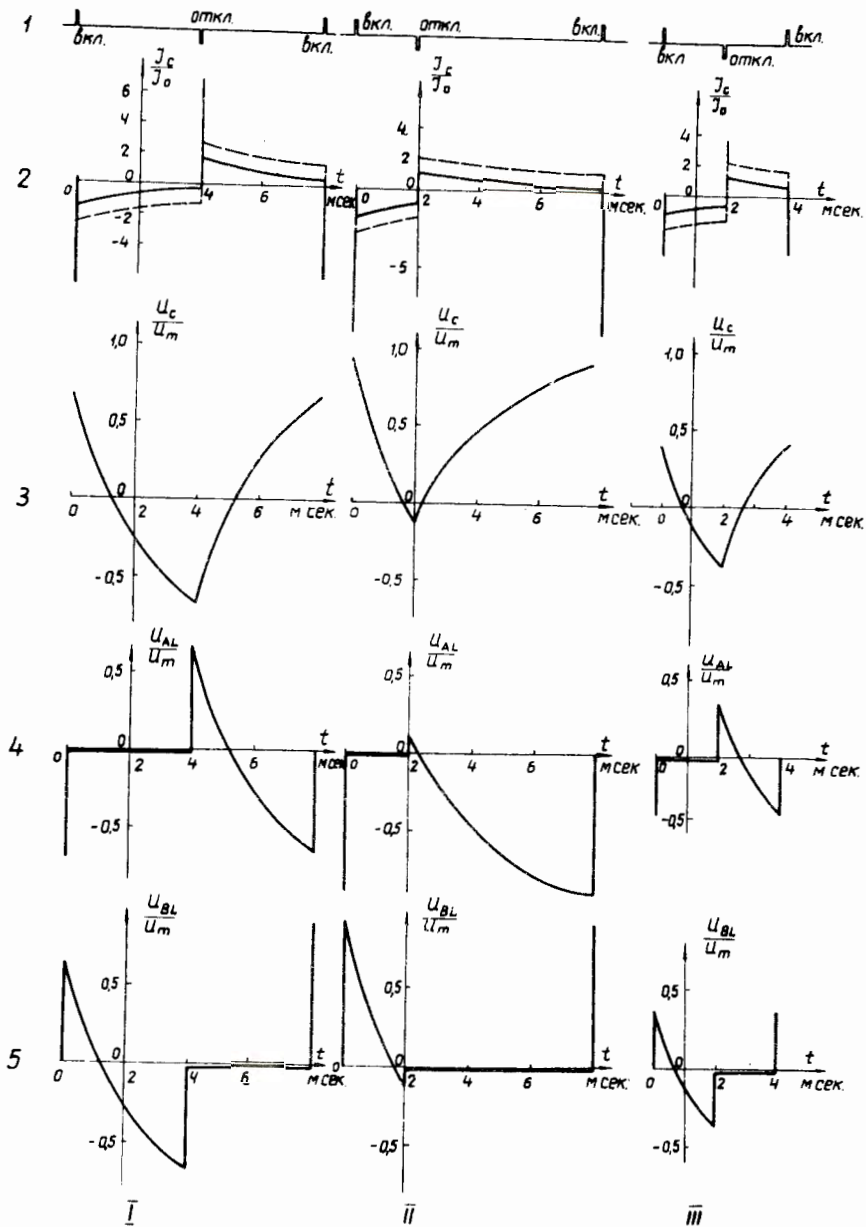


Рис. 7. Эпюры управляющих импульсов (1), емкостных токов (2), напряжений на конденсаторе (3) и катодах тиратронов (4,5) тиратронного триггера на холостом ходу: I - скважность 2,  $T=8$  мсек; II - скважность 2,  $T=8$  мсек; III - скважность 2,  $T=4$  мсек.  $U_m = E - \Delta U$ , где  $E$  - напряжение источника питания триггера,  $\Delta U$  - падение напряжения на горящем тиратроне,  $I_0$  - стационарный ток, протекающий через тиратрон. Пунктиром на эпюре (2) отмечен суммарный ток (емкостный и стационарный, протекающий через тиратрон).

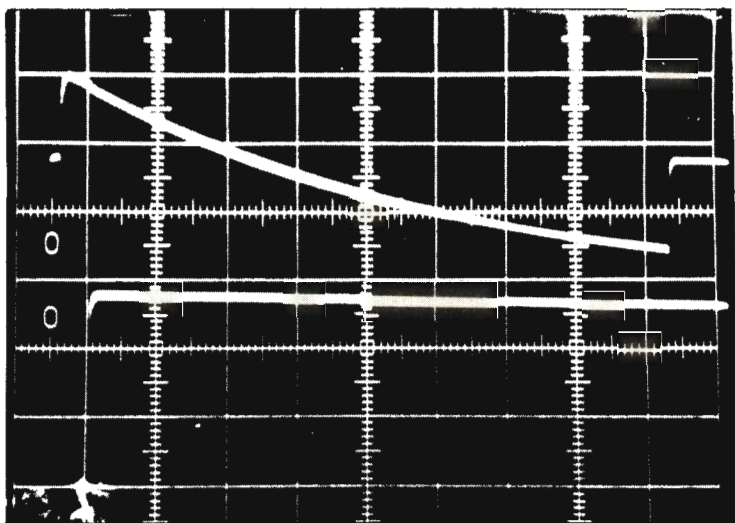
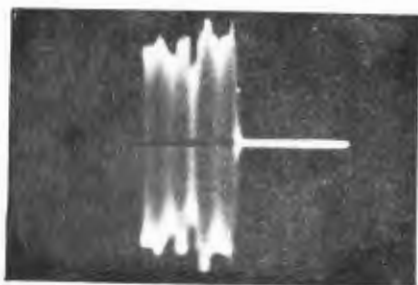
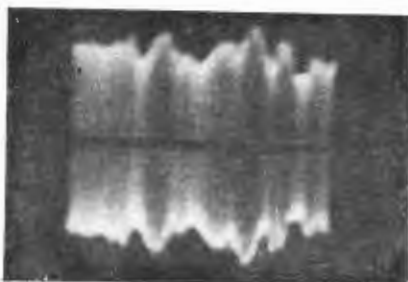


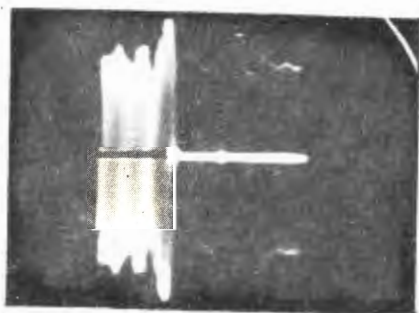
Рис. 8. Осциллограмма напряжения на катоде гиратрона для триггера на холостом ходу: масштаб по горизонтали 500 мксек/см, по вертикали 1 кв/см. На верхнем луче - напряжение на катоде при  $E = 2$  кв, на нижнем - включающий импульс.



устойчивая работа



переход в непрерывный режим



сбой манипуляции

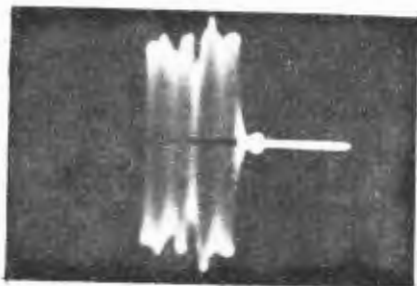


Рис. 9. Осциллограммы амплитуды напряжения в.ч. генератора при манипуляции.

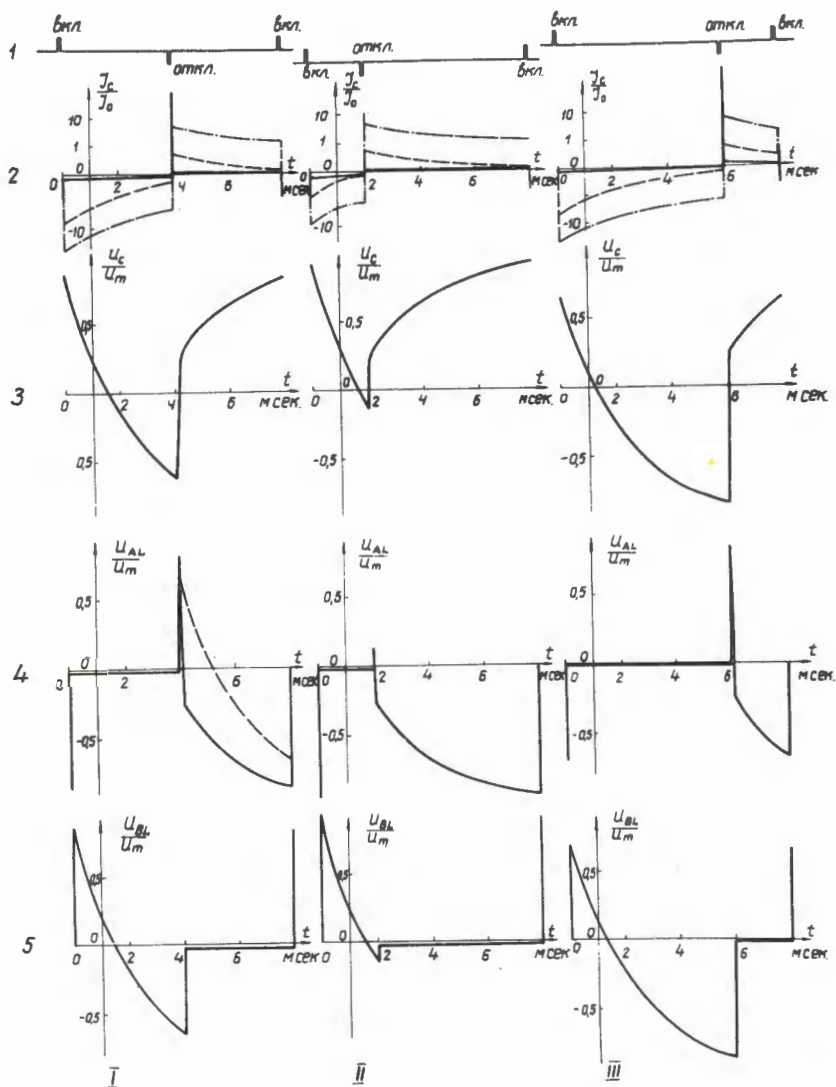


Рис. 10. Эпюры управляющих импульсов (1) емкостных токов (2), напряжений на конденсаторе (3) и вентилях (4,5) нагруженного тиристорного триггера при различных скважностях I - 2 II - 4 III - 4/3  $T = 8$  мсек  $U_m = E - \Delta U$ , где  $\Delta U$  - падение напряжения на горящем тиристоре,  $I_0$  - стационарный ток, протекающий через тиристор. На эпюре (2) масштаб сплошной и пунктирной кривой для тока  $I_c$  отличается на порядок. Штрих-пунктиром отмечен ток, протекающий через вентиль. Выбросы токов в увеличенном масштабе не показаны. На эпюре (4) пунктиром отмечено напряжение на катоде ненагруженного триггера.

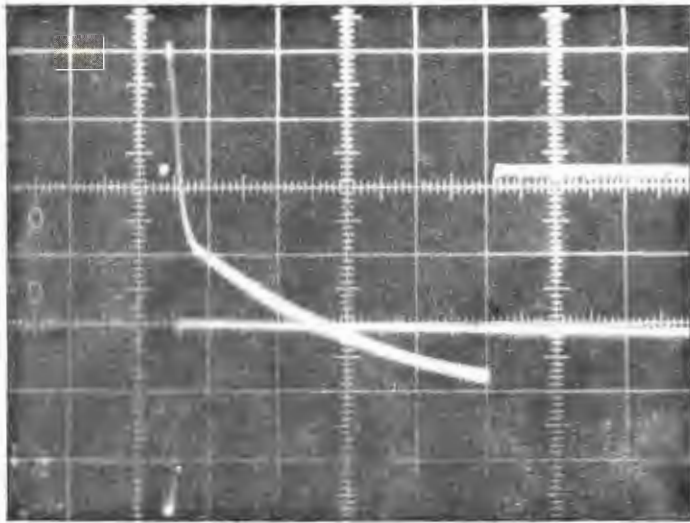


Рис. 11. Осциллограмма напряжения на катоде тиратрона для нагруженного триггера. Масштаб по горизонтали 1 мсек/см, по вертикали - 500 в/см. На верхнем луче - напряжение на катоде при  $E = 2$  кв. Из осциллограмм видно, что  $E_{г} = 700$  в. На нижнем луче - импульс, отключающий манипулятор.

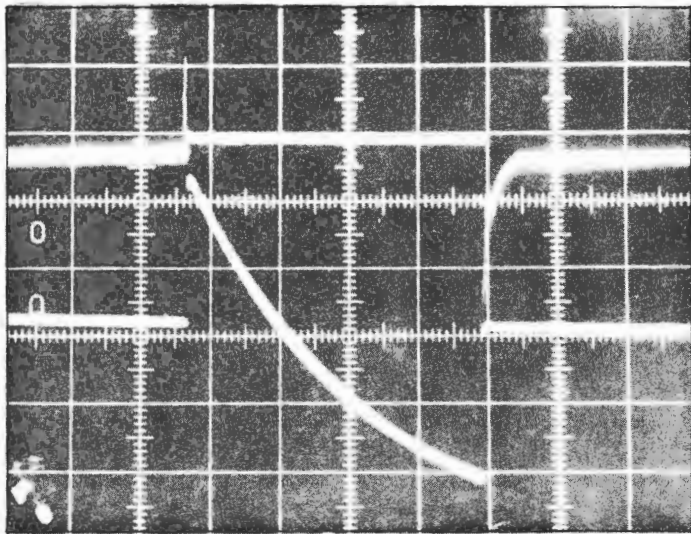


Рис. 12. Осциллограмма тока (верхний луч) и напряжения (нижний луч) на катоде вспомогательного тиратрона нагруженного триггера. Масштаб по горизонтали 1 мсек-см, по вертикали - для тока 1,3 а/см для напряжения 500 в/см.

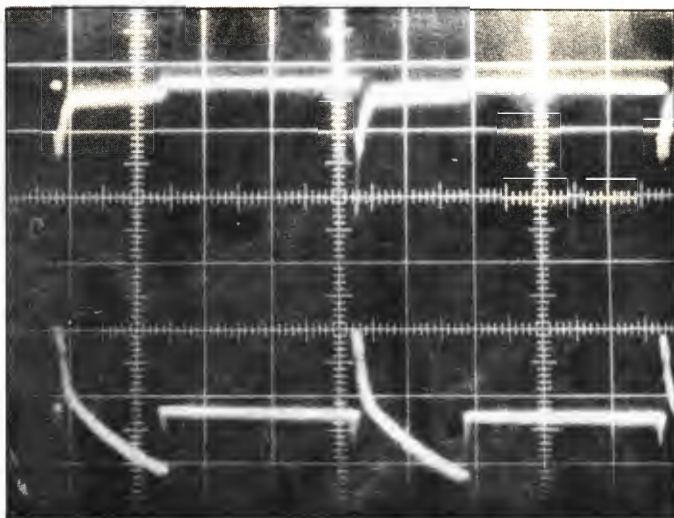


Рис. 13. Осциллограмма тока (верхний луч) ненагруженного плеча триггера и напряжения (нижний луч) нагруженного плеча триггера. Масштаб по горизонтали 2 мсек/см, по вертикали для тока 1,3 а/см, для напряжения 1 кв/см.  $E_s = 0$ .

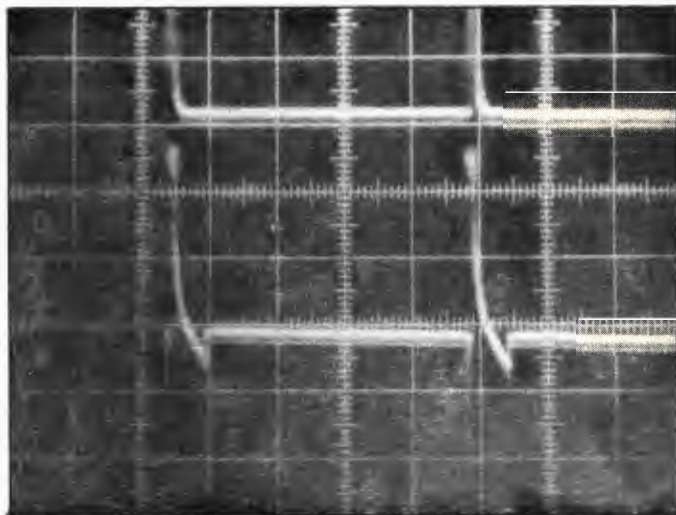


Рис. 14. Осциллограмма напряжения (нижний луч) на катоде нагруженного плеча триггера при скважности 1,13. Масштаб по горизонтали 1 мсек/см, по вертикали 500 в/см. На верхнем луче - отключающий импульс.



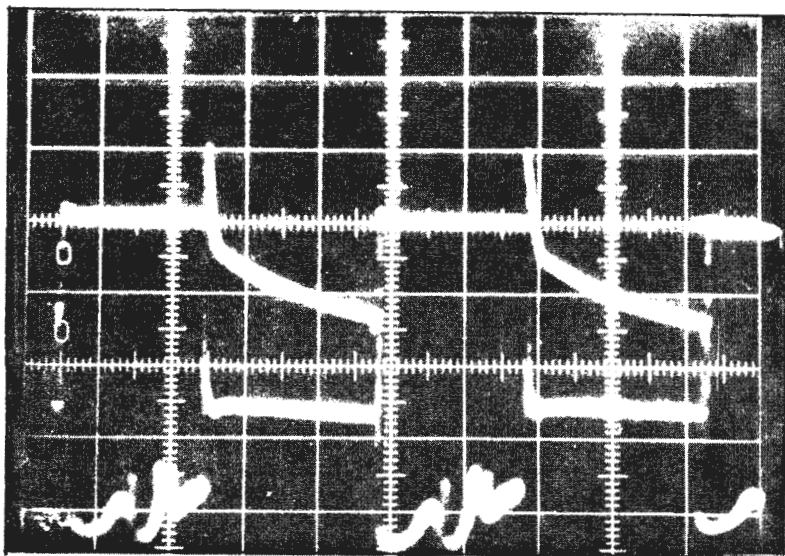


Рис. 15. Осциллограмма напряжения на катоде тиратрона (верхний луч) и тока (нижний луч) в нагруженном плече триггера при скважности  $\mu = 2$ . Масштаб по горизонтали 2 мсек/см, по вертикали для напряжения 1кв/см для тока 1а/см. Отчётливо видны крутой спад обратного напряжения, вызванный шунтирующим действием нагрузки и протеканием обратного тока через тиратрон перед его запираем. Видна также неравномерная интенсивность генерации по диапазону.

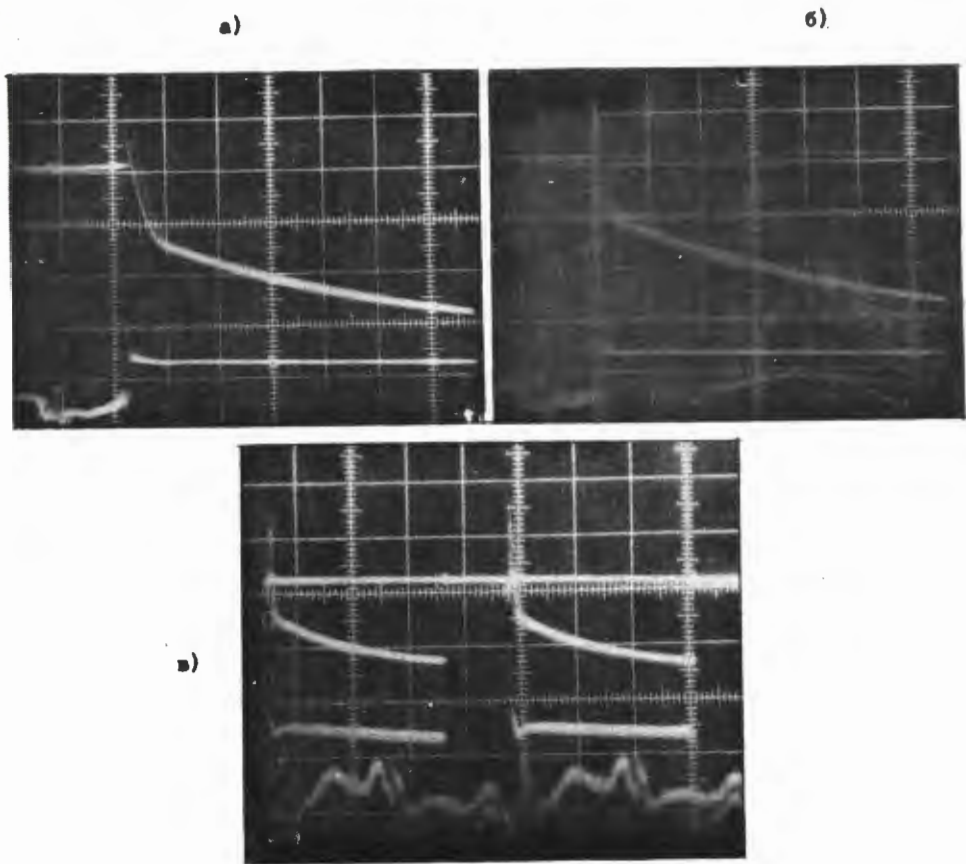
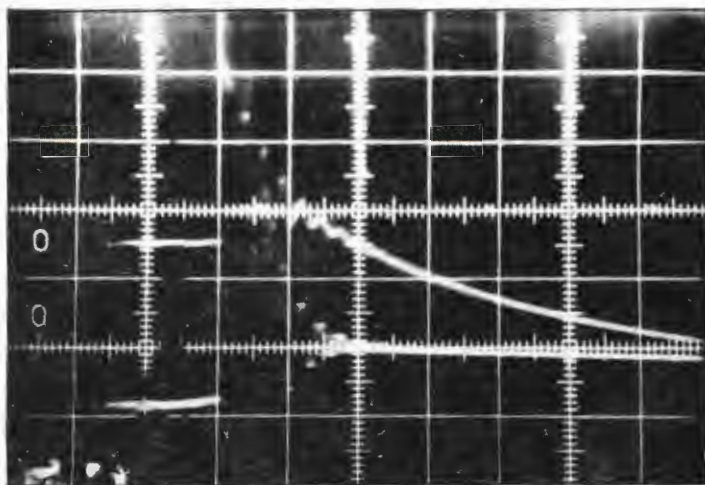
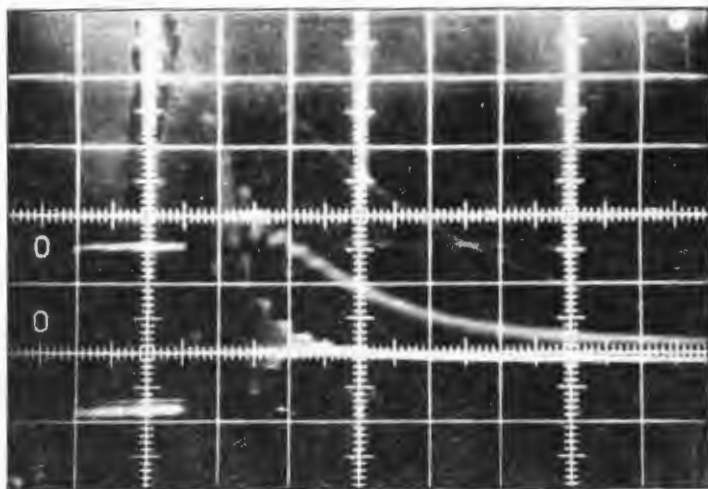


Рис. 16. Осциллограммы напряжений на катоде тиратрона (верхний луч) и токов (нижний луч) в нагруженном плече триггера. а) предел устойчивого запираия в.ч. генератора, б) срыв манипуляции. Масштаб по горизонтали 0,5 мсек/см, по вертикали для напряжения 500 в/см, для тока 2 а/см, в) срыв манипуляции. Масштаб по горизонтали 2 мсек/см, по вертикали для напряжения 1 кв/см для тока 1 а/см. Горизонтальная линия в осциллограмме напряжения соответствует горению тиратрона, в осциллограмме тока - запираению тиратрона.



а



б

Рис. 17. Осциллограмма напряжения на катоде (верхний луч) и тока (нижний луч) нагруженного плеча триггера. Развертка 50 мксек/см. а) предел устойчивого запираения,  $t_{01} \approx 100$  мксек, б) неустойчивая работа  $t_{01} < 100$  мксек. Колебательный характер осциллограмм тока и напряжения, по-видимому, вызван влиянием переходного процесса на длинном (400 м) кабеле, подключающем нагрузку. Срыв напряжения соответствует горизонтальной линии справа, срыв тока - волнистой линии справа. Верхняя экспонента, для которой  $t_{01} \approx$  порядка 200 мксек, соответствует нерегулярному - через один или несколько циклов срабатыванию манипулятора, связанному с зарядом переключающей емкости.

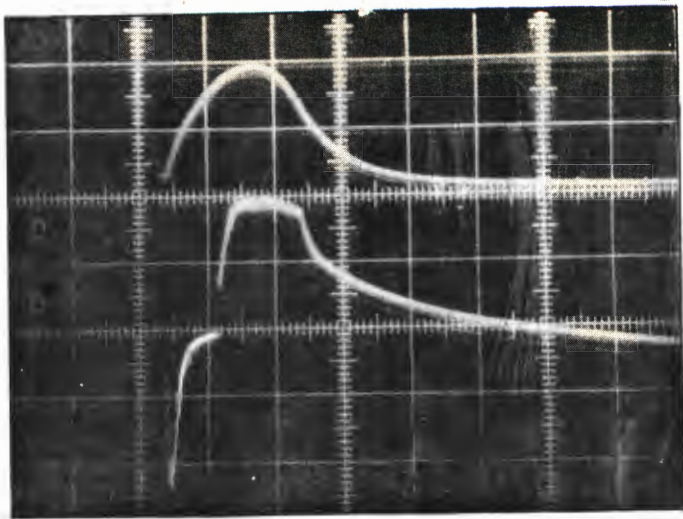


Рис. 18. Осциллограмма напряжения катода тиратрона, нагруженного плеча триггера (нижний луч). На верхнем луче - отключающий импульс, поданный на сетку тиратрона и на запуск осциллографа. Видно, что пока амплитуда отключающего импульса значительна, спад напряжения на катоде происходит с большей постоянной времени. Развертка 100 мксек/см.

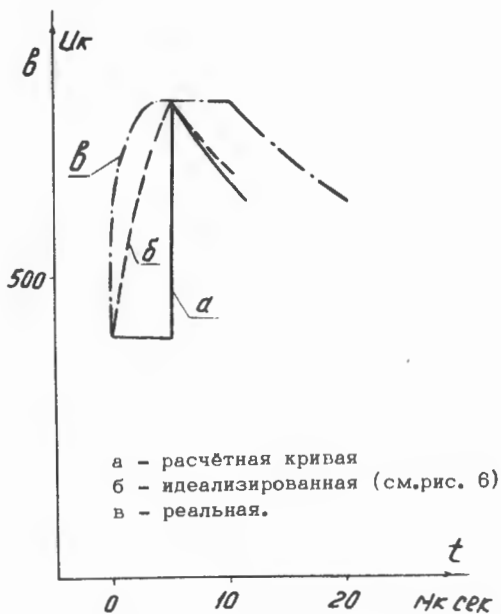
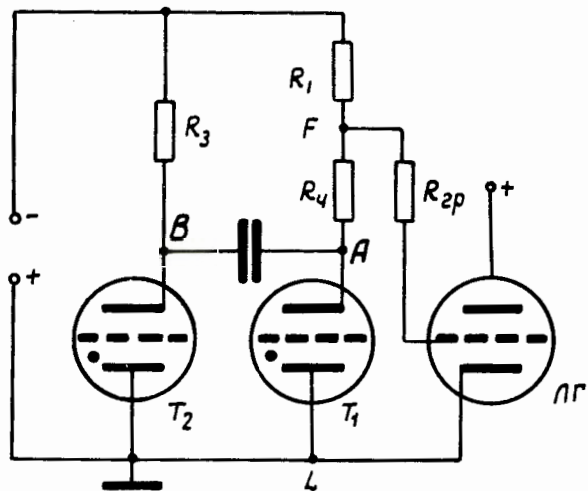
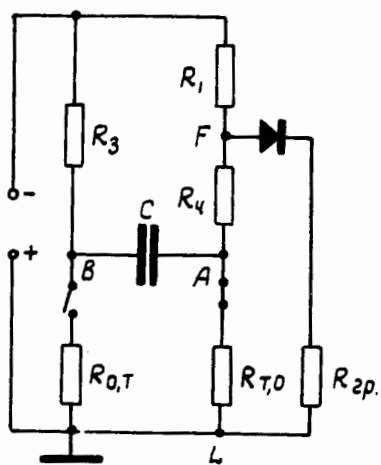


Рис. 19. Примерный вид фронта напряжения на катоде тиратрона.



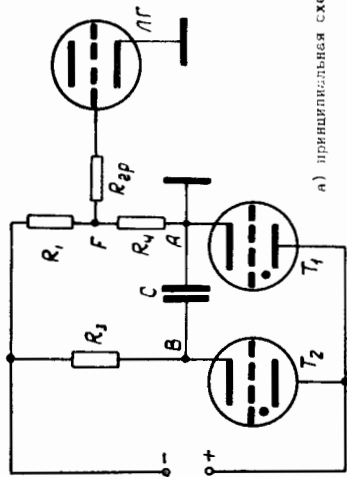
а



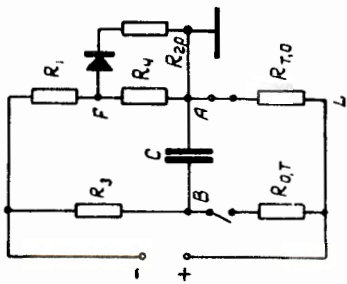
б

Рис. 20. Схема манипулятора с подачей принудительного смещения на сетку в.ч. генератора.

Нагрузка подключена между заземленным катодом тириатрона и частью сопротивления его плеча;

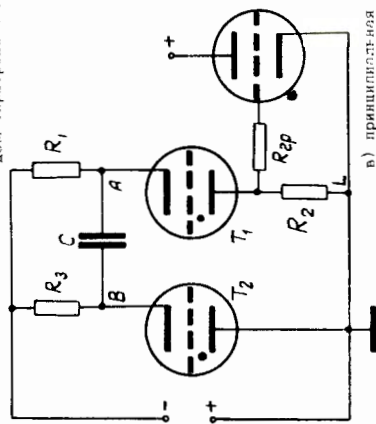


а) принципиальная схема

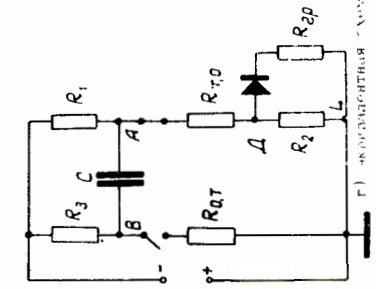


б) эквивалентная схема

Нагрузка подключена параллельно дополнительному сопротивлению между анодом тириатрона и заземленным полюсом источника питания.



в) принципиальная схема



г) эквивалентная схема

Триатронный триггер, свободный от тока нагрузки через тиристор.

Рис. 21.

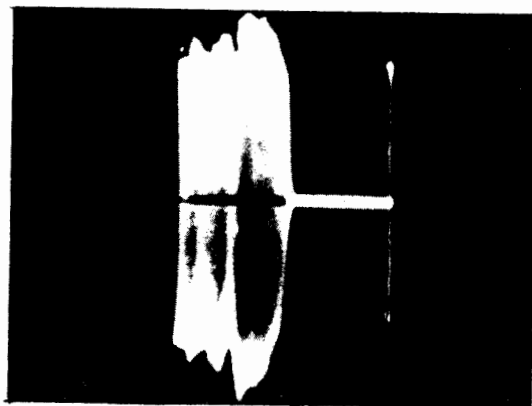


Рис. 22. Осциллограмма ускоряющего в.ч. напряжения. Длина развертки равна одному периоду модуляции 9 мсек. Нормальная интенсивность получалась только при включении в.ч. генератора на 100 мсёк раньше обычного. Начало развертки осциллографа отстает от момента включения напряжения на ускоряющем электроде.

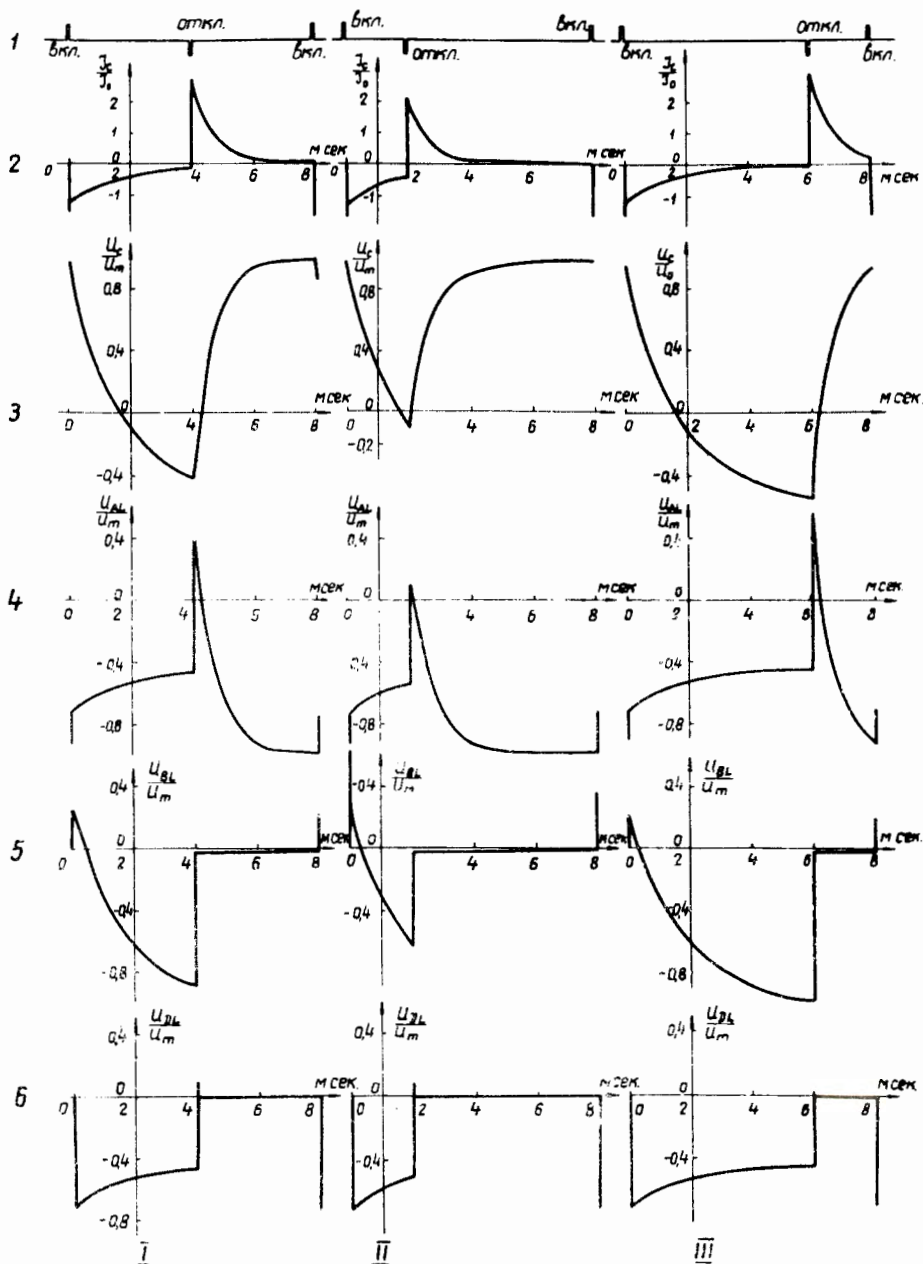


Рис. 23. Эпюры управляющих импульсов (1), емкостных токов (2), напряжений на емкости (3) и вентилях (4,5) тиратронного триггера, выдающего на нагрузку импульсы с крутыми фронтами. Период работы триггера  $T=8$  мсек, скважности I - 2; II - 4/3; III - 4.



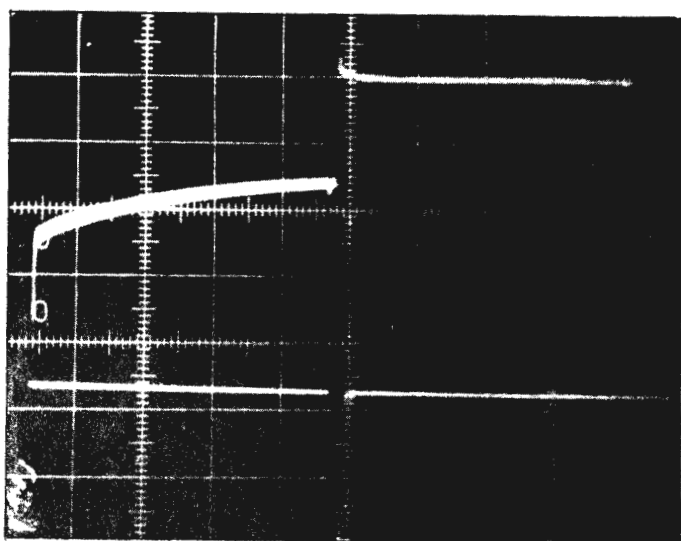
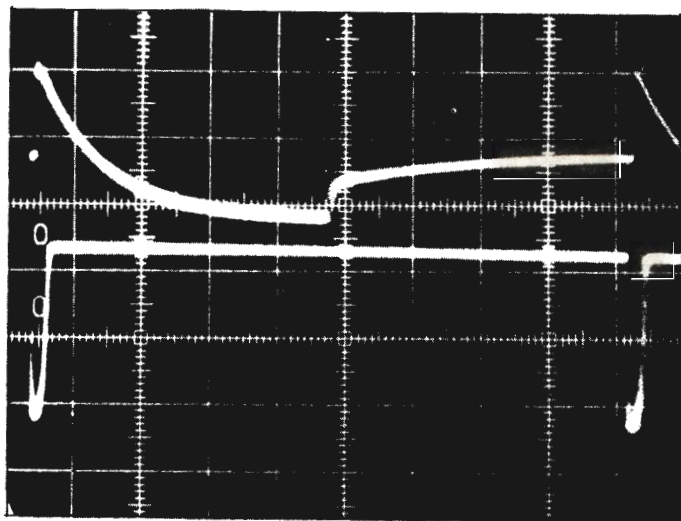


Рис. 24. Осциллограмма напряжения нагруженного плеча триггера; а) на катоде тиратрона (верхний луч); б) на сопротивлении нагрузки (верхний луч), на нижних лучах—включающие импульсы. Развертка 1 мсек/см.

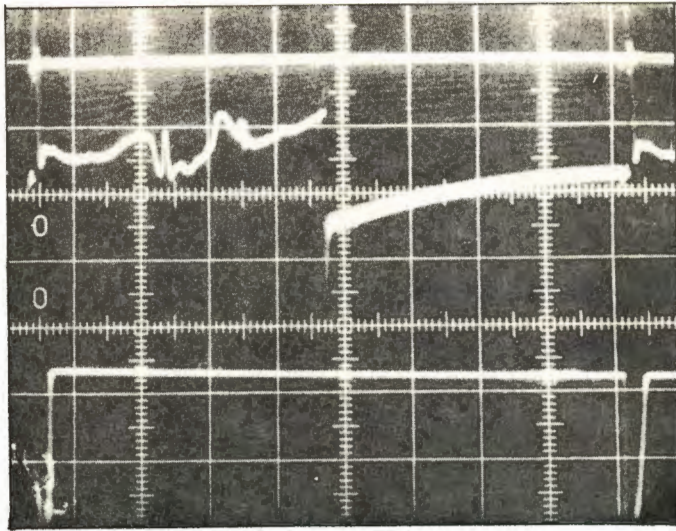


Рис. 25. Осциллограмма напряжения на нагрузке триггера. В первой половине периода видна огибающая сеточного тока, во второй половине периода - импульс, запирающий генератор (верхний луч). Подключение в.ч. генератора не меняет форму и амплитуду импульса отрицательной полярности, выдаваемого манипулятором (см.рис. 24). На нижнем луче - включающий импульс. Развертка 1 мсек/см.

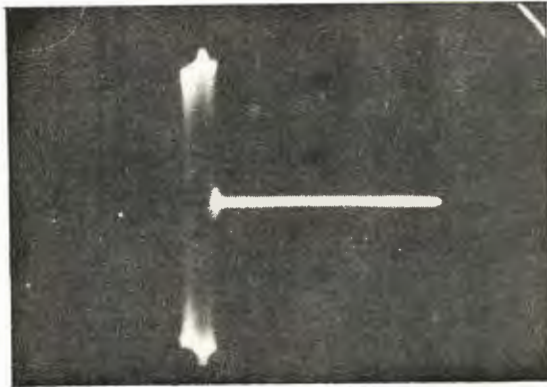


Рис. 26. Осциллограмма ускоряющего в.ч. напряжения при скважности 8 в форсированном режиме ( $E_{\text{а}} = 8,4$  кв).

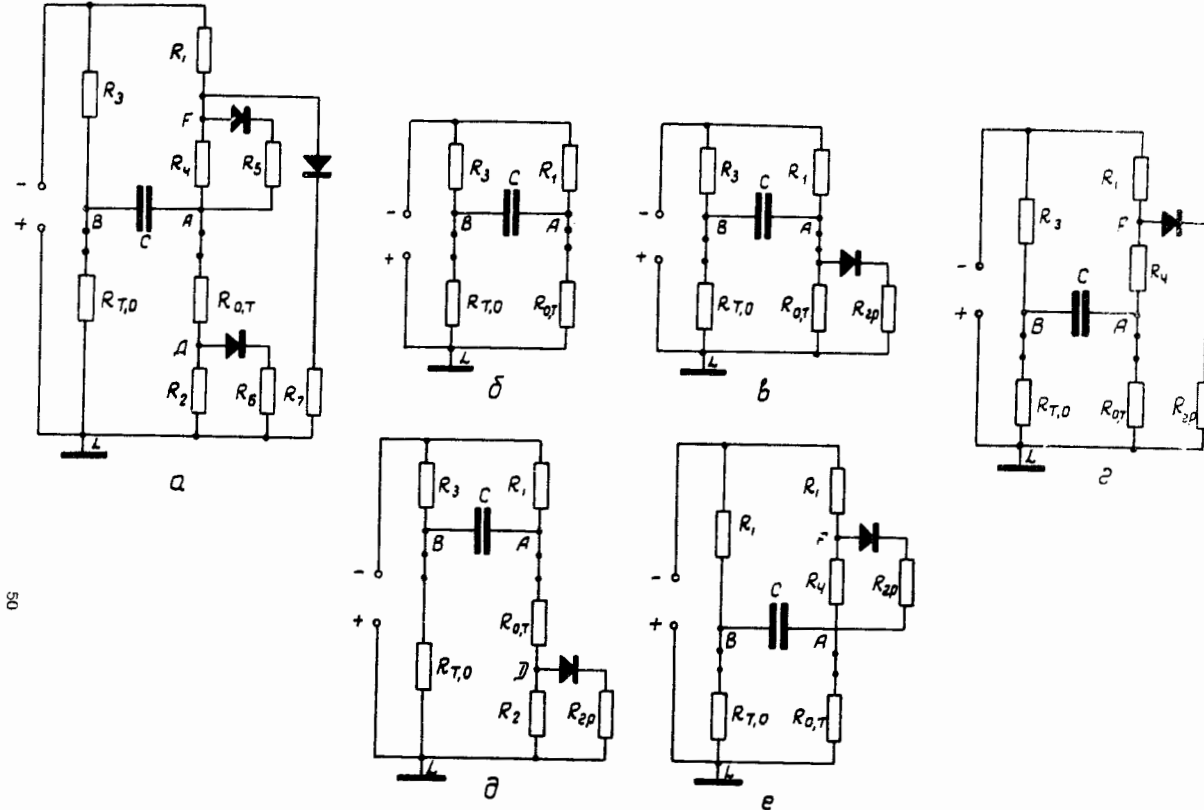


Рис. 27. а) Обобщенная схема нагруженного тиристорного триггера. б) Ненагруженный тиристорный триггер. Для того чтобы из схемы "а" получить схему "б", необходимо положить : 1)  $R_2 = R_4 = 0$ ; 2)  $R_3 = R_5 = R_7 = \infty$ . в) Нагруженный тиристорный триггер с вентилем, пропускающим ток нагрузки. Для того чтобы из схемы "а" получить схему "в", необходимо положить : 1)  $R_2 = R_4 = 0$ ; 2)  $R_3 = R_5 = \infty$ ; 3)  $R_7 = R_{TP}$ . г) Рабочий вариант схемы нагруженного тиристорного триггера. По сравнению со схемой "а" в схеме "г" положено: 1)  $R_2 = 0$ ; 2)  $R_3 = R_5 = \infty$ ; 3)  $R_7 = R_{TP}$ . д) Рабочий вариант схемы нагруженного тиристорного триггера, свободного от тока нагрузки через вентиль. По сравнению со схемой "а" в схеме "д" положено: 1)  $R_4 = 0$ ; 2)  $R_3 = R_5 = \infty$ ; 3)  $R_7 = R_{TP}$ . е) Нагруженный тиристорный триггер с плавным фронтом нарастания импульса, возбуждающего генерацию в нагрузке. В схеме "е" положено: 1)  $R_2 = 0$ ; 2)  $R_3 = R_5 = \infty$ ; 3)  $R_7 = R_{TP}$ .

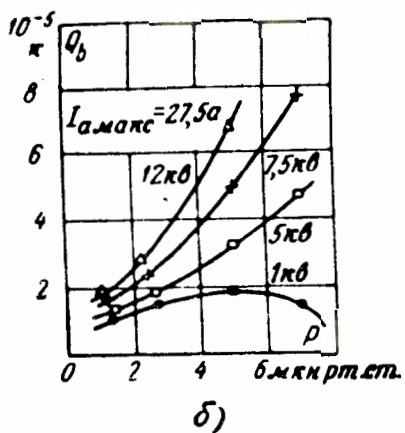
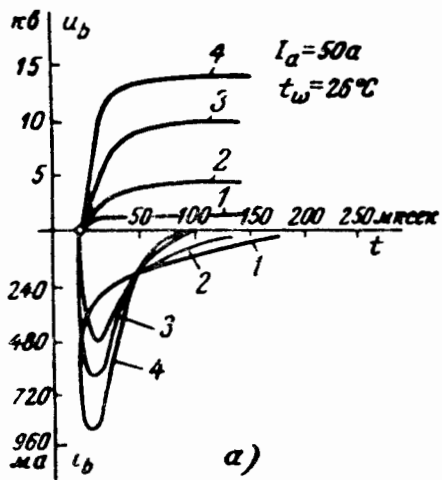


Рис.28. Осциллограмма обратного тока (а) и изменение остаточного заряда в функции от давления (б).

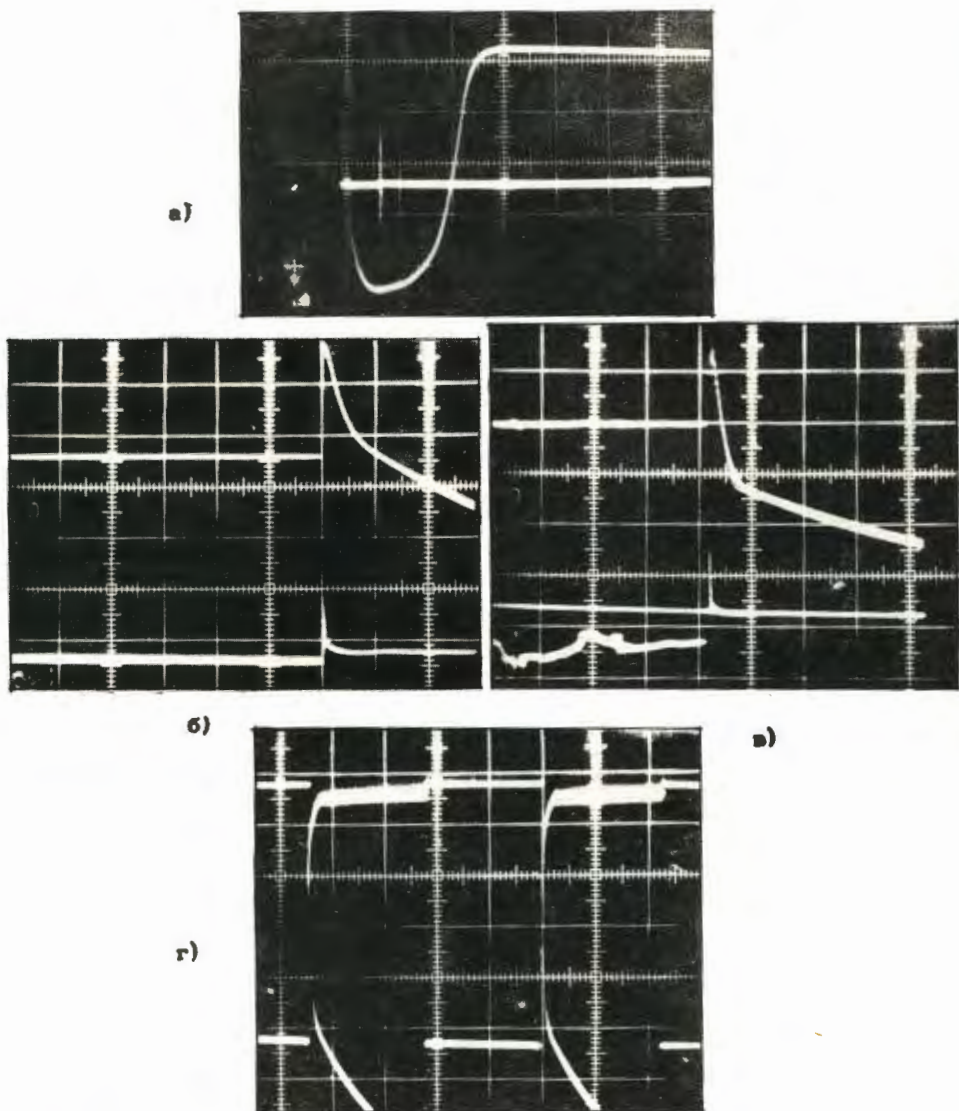


Рис.28. а) Прямой и обратный ток через тиратрон ненагруженного плеча триггера (нижний луч), масштаб тока 2 а/см. На верхнем луче - отключающий импульс, развертка 100 мксек/см. б) Прямой и обратный ток через тиратрон нагруженного плеча триггера при  $E_{ar} = 0$  (нижний луч), масштаб тока 2а/см. На верхнем луче - напряжение на катоде тиратрона, развертка 500 мксек/см. в) Прямой и обратный ток через тиратрон нагруженного плеча триггера при  $E_{ar} = 7$  кв (нижний луч). г) Выброс прямого тока ненагруженного плеча триггера, вызванный разрядом переключающего конденсатора через прямое сопротивление загорающегося тиратрона и обратное сопротивление погасающего тиратрона (см.рис.10,11и 12)

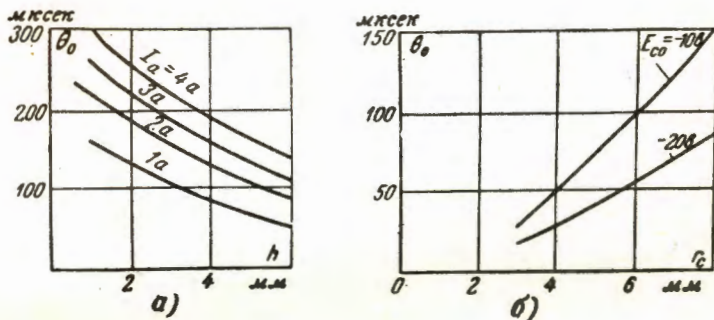
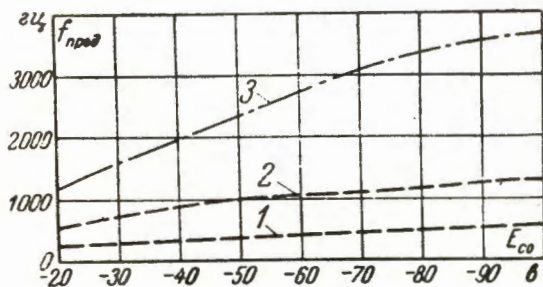
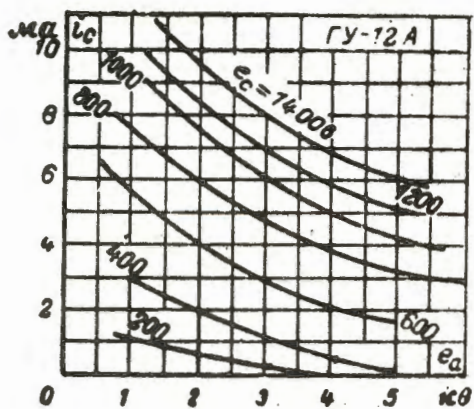


Рис.30. Кривые зависимости времени начала сеточного запаривания от высоты сетки (а) и радиуса сеточного отверстия (б).



Кривые предельной частоты для тиратрона ТГ1-0,1/1,3.

Рис.31. Зависимость предельной рабочей частоты тиратрона от величины сеточного смещения.



Характеристики сетчатого тока триода 6У-12А.

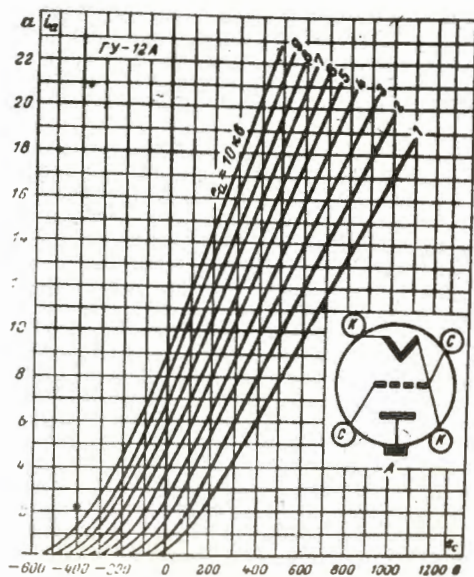
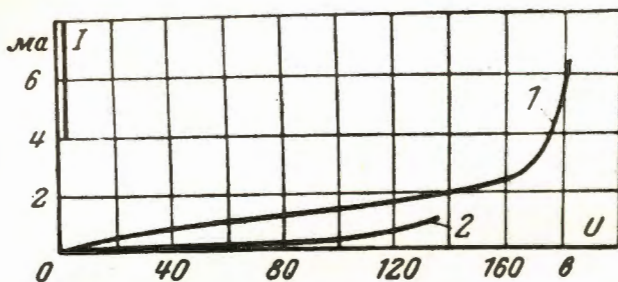
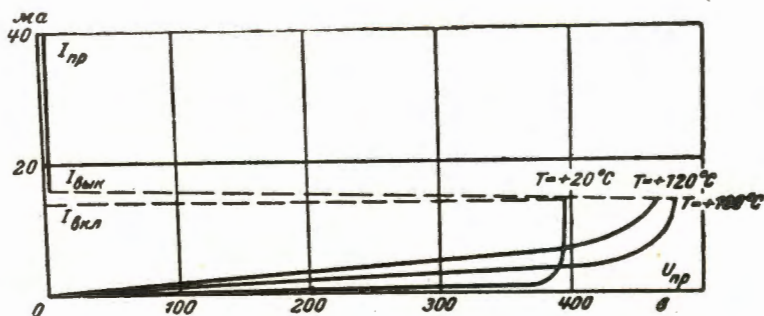


Рис.32. Анодно-сетчатые характеристики триода 6У-12А.



Вольт-амперная характеристика управляемого вентиля.

1 — слабо травленный эмиттерный переход; 2 — сильно травленный эмиттерный переход.



Прямая ветвь статической вольт-амперной характеристики (при малых токах и разных температурах) вентиля типа ВКДУ.

Рис.33. Статическая вольт-амперная характеристика тиристора.