

A-954

16/IX-68

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

13 - 3923



В.В.Ахманов, И.Б.Енчевич

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАСЧЕТ  
РАЗЛИЧНЫХ СХЕМ ТИРАТРОННОГО  
МАНИПУЛЯТОРА В.Ч. ГЕНЕРАТОРА  
СИНХРОЦИКЛОТРОНА НА 680 МЭВ

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

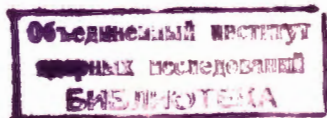
1968

7448/2 чр.

В.В.Ахманов, И.Б.Енчевич

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАСЧЕТ  
РАЗЛИЧНЫХ СХЕМ ТИРАТРОННОГО  
МАНИПУЛЯТОРА В.Ч. ГЕНЕРАТОРА  
СИНХРОЦИКЛОТРОНА НА 680 МЭВ

Направлено в Известия на БАН с АНЕБ"



## Введение

Для уменьшения потребления мощности высокочастотной системой и управления в.ч. генератором синхроциклотрона на 680 Мэв до 1967 г. использовался тиратронный манипулятор, собранный на тиратронах типа ТГ1-2, 5/4 по схеме, представленной на рис.1а /7/. Этот манипулятор работал при сеточном токе в.ч. генератора, равном 1,5а, и скважности манипуляции не более 2.

Применение на ускорителе "растяжки пучка" /4/ и необходимость исследования режимов накопления /5/, а также желание несколько форсировать работу в.ч. генератора для дальнейшего изучения возможности повышения интенсивности ускорителя, поставили задачу создания нового манипулятора, который надежно работал бы при скважностях, больше 2, и сеточных токах в.ч. генератора, значительно превышающих 1,5а.

### 1. Исследование работы существующего манипулятора (№1)

#### §1. Анализ работы тиратронного триггера

Рассмотрим предварительно работу обычного симметричного тиратронного триггера, на базе которого устроен тиратронный манипулятор. Схема тиратронного триггера /2/ представлена на рис.2, а диаграммы, иллюстрирующие его работу, - на рис.3а,б,в.

После переключения триггера напряжение на обкладках конденсатора  $U_c$ , а значит, и потенциал между катодом и анодом какого-либо

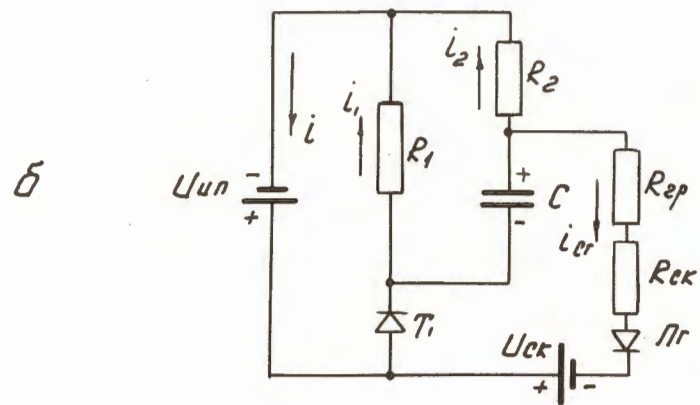
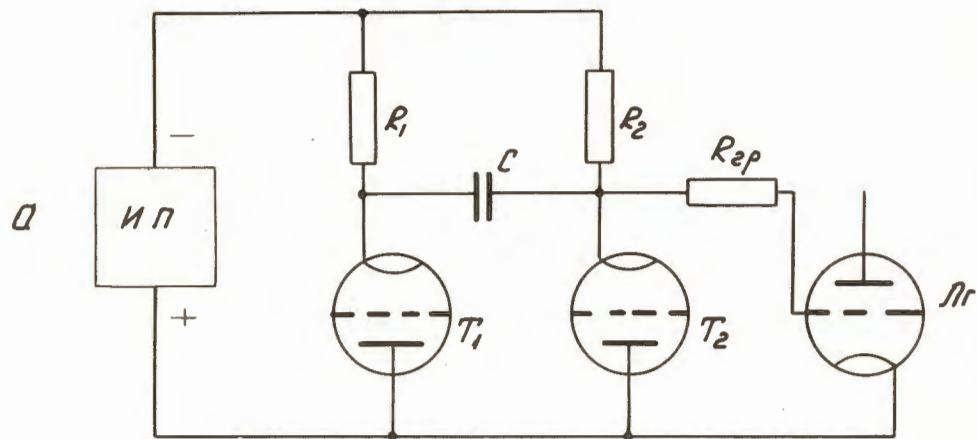


Рис.1. а - принципиальная схема манипулятора №1; б - эквивалентная схема манипулятора №1 после переключения с тиратрона  $T_2$  на  $T_1$ .

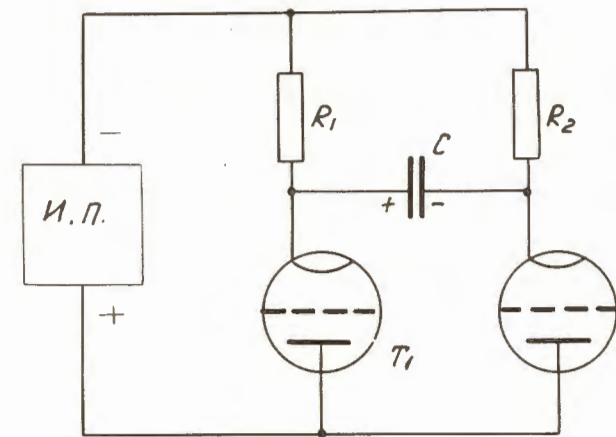


Рис.2. Принципиальная схема тиратронного триггера

тиратрона будет изменяться по экспоненциальному закону, определяемому уравнением (1): х)

$$U_{c1} = U_{c2} = U_c = U_{cн} e^{-\frac{t}{\tau}} - U_{ип} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \quad (1)$$

где  $U_{c1}$  - напряжение на конденсаторе после переключения триггера с тиратрона  $T_1$  на тиратрон  $T_2$  ;

$U_{c2}$  - напряжение на конденсаторе после переключения триггера с тиратрона  $T_2$  на  $T_1$  ;

$U_{ип}$  - напряжение источника питания;

$U_{cн}$  - начальное напряжение на конденсаторе;

$t$  - время;

$\tau$  - постоянная времени изменения напряжения на конденсаторе.

Для симметричного триггера  $U_{c1} = U_{c2} = U_c$ ,  $\tau_1 = \tau_2 = \tau = RC$ .

Если время горения каждого из тиратронов триггера достаточно большое, и конденсатор успевает перезарядиться до полного напряжения источника питания, т.е.  $U_{cн1} = U_{cн2} = U_{ип}$ , формула (1) упрощается и принимает вид (1а)

$$U_c = -U_{ип} (1 - 2e^{-\frac{t}{\tau}}). \quad (1a)$$

На рисунке 3а показана диаграмма импульсов управления триггером;  $U_1$  - импульс управления тиратроном  $T_1$ ,  $U_2$  - импульс управления тиратроном  $T_2$ . На рисунке 3б жирной линией изображена кривая изменения напряжения на конденсаторе после переключения с тиратрона  $T_1$  на тиратрон  $T_2$ , а для случая обратного переключения эта же кривая показана на рисунке 3в. Из рисунка 3а,б,в видно, что если изменять фазу

х)

В этой формуле и во всех последующих не учитывается снижение начального напряжения на конденсаторе  $U_{cн}$  из-за обратного пропускания тиратрона в первый момент переключения, ввиду малой величины этого времени для применяемых тиратронов (см. кратковременные выбросы в момент переключения тиратронов на осциллограмме рис.11 и 12).

xx) Здесь и во всех дальнейших формулах для  $\tau$  не учитывается, ввиду малого его значения, сопротивление проводящего тиратрона.

импульса управления  $U_1$  или  $U_2$ , то будет изменяться и  $U_{сн}$  — начальное напряжение на конденсаторе, прикладываемое между катодом и анодом какого-либо тиратрона в первый момент переключения. Так, при перемещении импульса  $U_1$  от точки 3 по направлению к точке 2 (см. рисунок 3а), начальное значение напряжение на конденсаторе " $U_{сн2}$ ", прикладываемое в первый момент переключения с тиратрона  $T_2$  на  $T_1$  между катодом и анодом тиратрона  $T_2$ , будет уменьшаться по кривой 3'' — 2'' (пунктирная кривая на рис. 3в, соответствующая кривой 3'-2' рисунка 3б). При приближении фазы импульса  $U_1$  к точке 2  $U_{сн2}$  будет приближаться к  $U_{а.з}$  — минимальному анодному напряжению зажигания тиратрона, и за точкой 2 произойдет срыв в работе триггера, так как тиратрон  $T_2$  не погаснет. При перемещении импульса  $U_1$  в правую сторону от точки 3 будет уменьшаться начальное напряжение на конденсаторе " $U_{сн1}$ ". Характер изменения  $U_{сн1}$  показан кривой 3''' — 5' на рисунке 3б, соответствующей по форме кривой 1' — 4' рисунка 3в. В момент перехода фазы импульса  $U_1$  через точку 5 произойдет также срыв работы триггера, так как с поступлением импульса  $U_2$  на тиратрон  $T_2$  тиратрон  $T_1$  не погаснет. Из анализа процесса работы тиратронного триггера ясно, что для расширения зоны устойчивой работы при приближении импульса управления  $U_1$  к фазе импульса  $U_2$  необходимо уменьшать постоянную времени коммутирующего конденсатора. Минимально возможная величина постоянной времени коммутирующего конденсатора определяется временем, необходимым для восстановления запирающего действия сетки тиратрона " $t_{в.з.}$ " и анодным напряжением зажигания тиратрона при напряжении на сетке, равном нулю " $U_{а.з.}$ ". На рисунках 3б и 3в тонкой прямой, перпендикулярной к оси абсцисс, отмечено время, необходимое для восстановления запирающего действия сетки тиратрона " $t_{в.з.}$ ", и штрихпунктирной прямой, параллельной оси абсцисс, — анодное напряжение зажигания тиратрона при напряжении на сетке, равном нулю " $U_{а.з.}$ ". Если кривая изменения напряжения на конденсаторе пройдет левее точки пересечения  $t_{в.з.}$  с  $U_{а.з.}$ , то тиратрон загорается вновь и переключения на другой тиратрон не происходит. На рисунках 3б и 3в тонкой линией показана граничная кривая изменения напряжения на конденсаторе. Область справа от этой кривой —

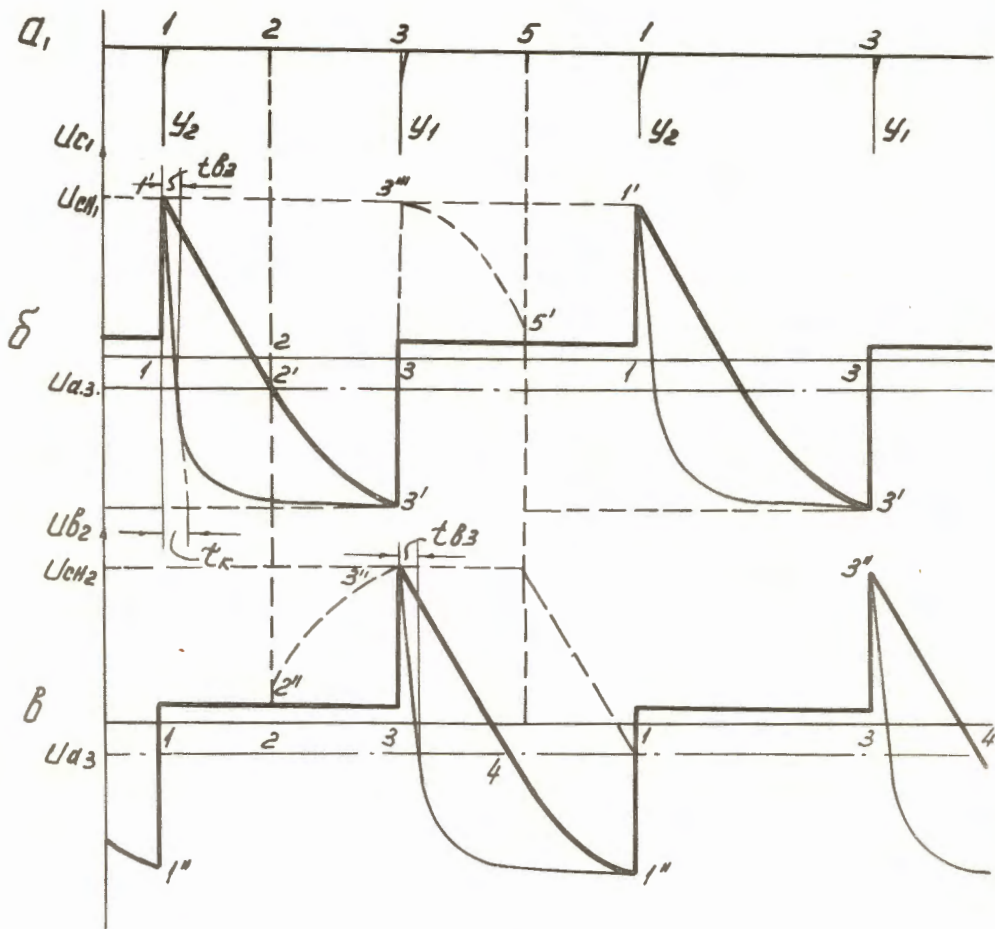


Рис.3. Диаграммы работы тириatronного триггера; а - диаграмма импульсов управления триггером; б - диаграмма изменения напряжения на конденсаторе после переключения с тириatronа  $T_1$  на  $T_2$ ; в - диаграмма изменения напряжения на конденсаторе после переключения с тириatronа  $T_2$  на  $T_1$ .  $Y_1$  - импульс управления тириatronом  $T_1$ ;  $Y_2$  - импульс управления тириatronом  $T_2$ ;  $U_{cH1}$ ,  $U_{cH2}$  - начальное напряжение на конденсаторе;  $U_{a.з.}$  - анодное напряжение зажигания тириatronа при нулевом напряжении на сетке;  $t_{в.з.}$  - время восстановления запирающего действия сетки тириatronа;  $t_{кр}$  - критическая постоянная времени триггера при показанном  $U_{cH}$ ;  $3''-5'$  - кривая изменения начального напряжения на конденсаторе " $U_{cH1}$ " при изменении фазы импульса  $Y_1$  в интервале 3-5;  $3''-2''$  - кривая изменения начального напряжения на конденсаторе " $U_{cH2}$ " при изменении фазы импульса  $Y_1$  в интервале 3-2.

область устойчивой работы триггера, слева - область срыва работы. Постоянную времени граничной кривой " $r_k$ " (критическую постоянную времени триггера) можно ориентировочно определить аналитически. Известно, что для нормальных типов тиратронов время восстановления запирающего действия сетки " $t_{в.э.}$ " лежит в пределах  $100+250$  мсек /2/. Анодное напряжение зажигания тиратрона при нулевом напряжении на сетке " $U_{аз}$ " можно определить для выбранного типа тиратрона по области пусковых характеристик, приводимых в справочниках. Лучше брать минимальное значение  $U_{а.э.}$  для данной области пусковых характеристик. Используя указанные данные и пользуясь формулой (2), выведенной из формулы (1), можно определить  $r_k$  :

$$r_k = \frac{t_{в.э.}}{\ln \frac{U_{ип} + U_{сн}}{U_{ип} - U_{аз}}}, \quad (2)$$

где:  $r_k$  - постоянная времени граничной кривой в сек;

$U_{ип}$  - напряжение источника питания;

$U_{сн}$  - начальное напряжение на конденсаторе;

$U_{а.э.}$  - анодное напряжение зажигания тиратрона при нулевом напряжении на сетке;

$t_{в.э.}$  - время восстановления запирающего действия сетки тиратрона в сек.

Из (2) следует, что чем ниже  $U_{сн}$  - начальное значение напряжения на конденсаторе, тем большую постоянную времени  $r_k$  будет иметь граничная кривая. Таким образом, при изменении фазы управляющего импульса  $U_1$ , или  $U_2$  мы будем иметь целое семейство граничных кривых, от кривой  $r_{k \min}$  при  $U_{сн} = U_{ип}$  до кривой  $r_{k \max}$  при  $U_{сн} = U_{аз}$ . Для триггера, выполненного на тиратронах типа ТГ1-2,5/4 и примененного в манипуляторе №1, были вычислены по формуле (2)  $r_{k \min}$  и  $r_{k \max}$ . По характеристике поджигания найдено  $U_{а.э.} = 140$ в, время восстановления запирающего действия сетки было взято  $t_{в.э.} = 100$  мсек, напряжение источника питания триггера  $U_{ип.} = 1700$  в.

При  $U_{сн} = U_{ип.}$  имеем  $r_{k \min} = \frac{100}{\ln \frac{1700 + 1700}{1700 - 140}} = 128$  мсек.



$$\text{При } U_{\text{сн}} = U_{\text{а.э.}} \quad r_{\text{k max}} = \frac{100}{I_{\text{n}} \frac{1700 + 140}{1700 - 140}} = 600 \text{ мксек.}$$

Как видно из проведенного вычисления, при необходимости глубокого регулирования фазы управляющего импульса надо иметь постоянную времени переключающего конденсатора не меньшую 600 мксек.

## §2. Анализ работы схемы существующего манипулятора №1

Схема существующего манипулятора представлена на рисунке 1а, а диаграммы, отражающие его работу, — на рис.4. Манипулятор №1 отличается от рассмотренной схемы тиратронного триггера тем, что параллельно тиратрону  $T_2$  включается цепь гридлик-сетка — катод генераторной лампы "Л<sub>Г</sub>". Триггер в процессе своей работы воздействует на подключенную сеточную цепь и управляет в.ч. генератором синхроциклотрона. При работе тиратрона  $T_1$  на сетку лампы генератора через сопротивления  $R_2$  и  $R_{\text{тр}}$  подается минус источника питания манипулятора №1, который запирает в.ч. генератор. После переключения на тиратрон  $T_2$ , сеточная цепь лампы Л<sub>Г</sub> замыкается через тиратрон  $T_2$  на катод, и генератор возбуждается. При обратном переключении с тиратрона  $T_2$  на  $T_1$  манипулятор №1 запирает в.ч. генератор не сразу. После погасания тиратрона  $T_2$  в сеточную цепь генератора через тиратрон  $T_1$  включается заряженный конденсатор "С", создающий положительное смещение на сетке лампы "Л<sub>Г</sub>". В.ч. генератор дополнительно подвозбуждается и потом находится в возбужденном состоянии до тех пор, пока конденсатор не перезарядится до напряжения отсечки лампы Л<sub>Г</sub> — "U<sub>оф</sub>". Таким образом, для того, чтобы запереть генератор в нужный момент, нужно  $U_1$  — импульс управления тиратроном  $T_1$ , сдвинуть по фазе в сторону опережения на величину  $t_{\text{зд}}$  (см. рисунок 4а, в и г). Такой сдвиг уже уменьшает возможность работы генератора с большими скважностями, так как приближает по фазе импульс  $U_1$  к точке "2". Кроме того, включение сеточной цепи гридлик-сетка-катод лампы Л<sub>Г</sub> параллельно тиратрону  $T_2$  вызывает уменьшение постоянной времени  $r_2$  триггера. Эквива-

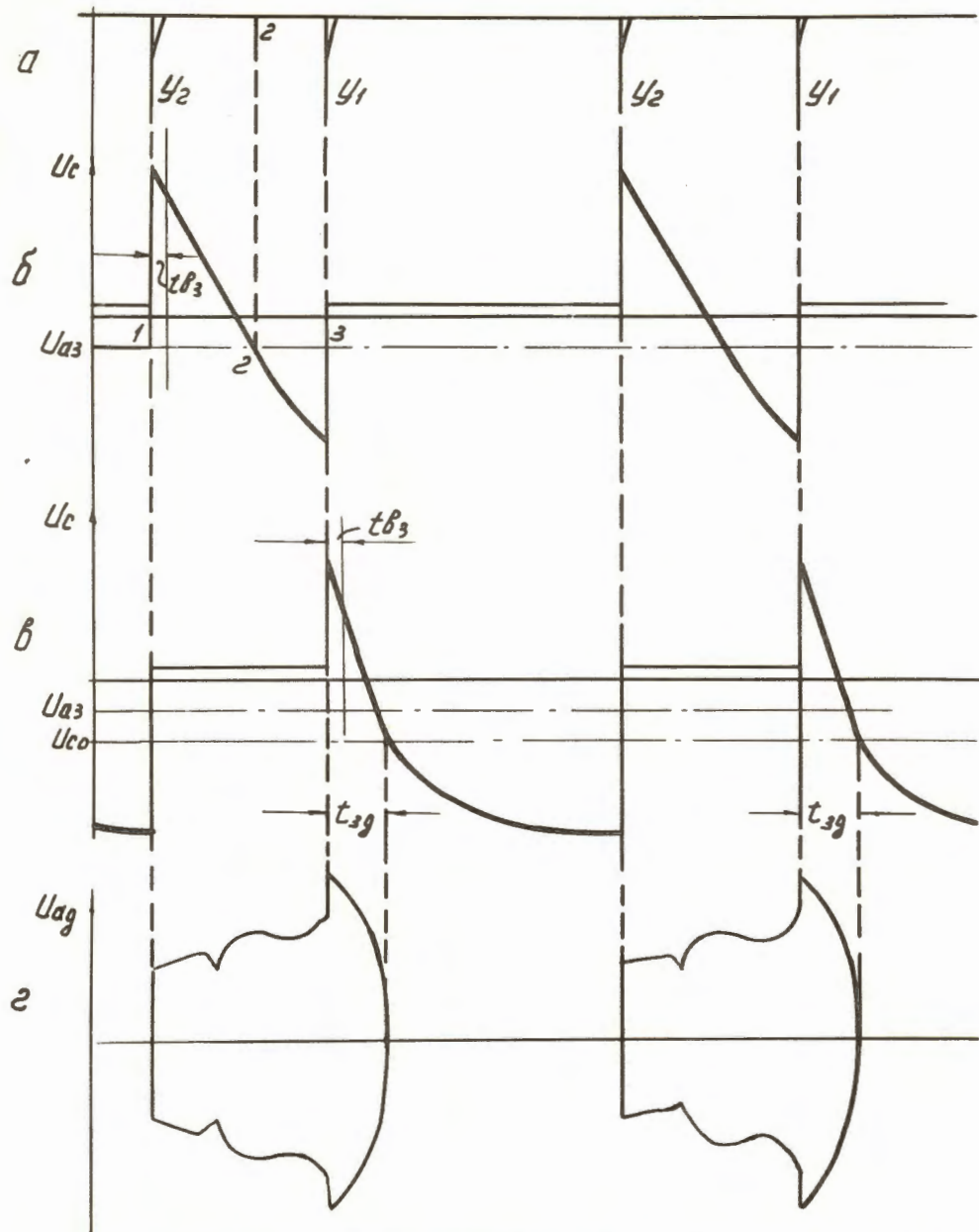


Рис.4. Диаграммы работы манипулятора №1; а - диаграмма импульсов управления манипулятором №1; б - диаграмма изменения напряжения на конденсаторе после переключения с тиратрона  $T_1$  на  $T_2$  (толстая линия); в - диаграмма изменения напряжения на конденсаторе после переключения с тиратрона  $T_2$  на  $T_1$  (тонкая линия); г - огибающая изменения амплитуды в.ч. напряжения на дуанте синхротриодного.

лентная схема манипулятора №1 после переключения с тиратрона  $T_2$  на  $T_1$  показана на рисунке "16", а постоянная времени изменения напряжения на конденсаторе при горении тиратрона  $T_1$  будет иметь вид:

$$r_2 = C \frac{R_2(R_{Гр} + R_{Ск})}{R_2 + R_{Гр} + R_{Ск}}, \quad (3)$$

где:  $R_2$  -сопротивление плеча триггера;

$R_{Гр}$  -сопротивление гридлика;

$R_{Ск}$  -сопротивление сетка-катод лампы в.ч. генератора;

$C$  -емкость переключающего конденсатора.

В эквивалентной схеме введены дополнительные обозначения:

$U_{Ск}$  -напряжение автоматического смещения ламп в.ч. генератора;

$i_{Ск}$  -сеточный ток генератора лампы.

Напряжение на конденсаторе "С" в схеме манипулятора №1 определяется, как и для тиратронного триггера с отключенной нагрузкой, формулой (1) или (1а), но здесь  $r_1 = R_1 C$  остается прежним, а  $r_2$  находится по формуле (3).

Из выражения (3) ясно, что  $r_2$  зависит не только от постоянных по величине сопротивлений, но и от переменного сопротивления сетка-катод генератора.

По нашим измерениям в рабочем диапазоне частот средняя величина сопротивления сетка-катод генераторной лампы  $R_{Ск,ср.} = 620$  ом. У манипулятора №1 сопротивление  $R_2 = 5000$  ом,  $C = 0,2$  мкф. и сопротивление гридлика при обычном режиме в.ч. генератора  $R_{Гр} = 360$  ом.

Подставляя все эти данные в выражение для  $r_2$ , находим:

а) для триггера с отключенной нагрузкой

$$r_2 = R_2 C = 5000 \cdot 0,2 \cdot 10^{-6} = 1 \text{ мсек};$$

б) при  $R_{Гр} = 360$  ом и  $R_{Ск,ср} = 620$  ом по формуле (3)

$$r_2 = 0,2 \cdot 10^{-6} \frac{5000 (360 + 620)}{5000 + 360 + 620} = 164 \text{ мксек.}$$

Произведенные подсчеты показывают, что:

1. Подключение к триггеру сеточной цепи в.ч. генератора приводит к резкому снижению постоянной времени  $\tau_2$ .

2. Для манипулятора №1, даже при обычном режиме в.ч. генератора, средняя величина  $\tau_2$  ср близка к минимальной критической постоянной времени  $\tau_k$  (см. §1 этой главы) и уже при незначительном увеличении скважности манипуляции приводит к срыву, поскольку критическая постоянная времени  $\tau_k$  возрастает и становится больше  $\tau_2$  ср.

При форсированном режиме в.ч. генератора  $\tau_2$  ср еще сильнее падает и становится меньше даже  $\tau_{k \min}$  и манипулятор совсем перестает работать.

На рис.5 и 6 приведены осциллограммы, иллюстрирующие работу манипулятора №1. На рис.5 показана манипуляция в.ч. напряжения при скважности 2, на рис.6 - начало срыва манипулятора при незначительном увеличении скважности.

Из проведенного анализа схемы манипулятора №1 можно сделать следующие выводы:

1. Схема манипулятора №1 с применением в качестве коммутирующих элементов тиратронов не позволяет получать манипуляцию с большими скважностями и не может работать при больших сеточных токах в.ч. генератора.

2. Для обеспечения надежной работы тиратронного манипулятора с большими скважностями и форсированных режимах в.ч. генератора необходимо составить такую схему, которая исключила бы влияние цепи грид-лик-сетка-катод генератора на постоянную времени плеча триггера  $\tau_2$ .

Если применить в схеме манипулятора №1 в качестве коммутирующих элементов тиристоры, имеющие время переключения порядка 20 мксек, то можно и при этой схеме получать манипуляцию с большими скважностями при нормальном и форсированном режимах в.ч. генератора.

Были рассмотрены две схемы тиратронного манипулятора, исключаящие влияние сеточной цепи в.ч. генератора на работу триггера.

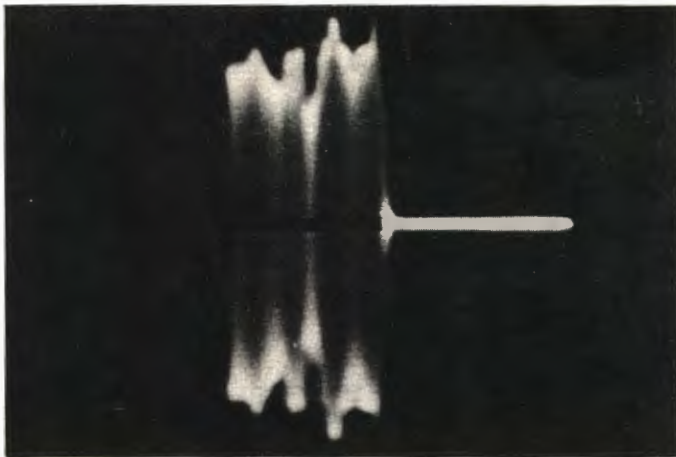


Рис.5. Осциллограмма огибающей амплитуды в.ч. напряжения при работе манипулятора №1 со скважностью манипуляции 2.

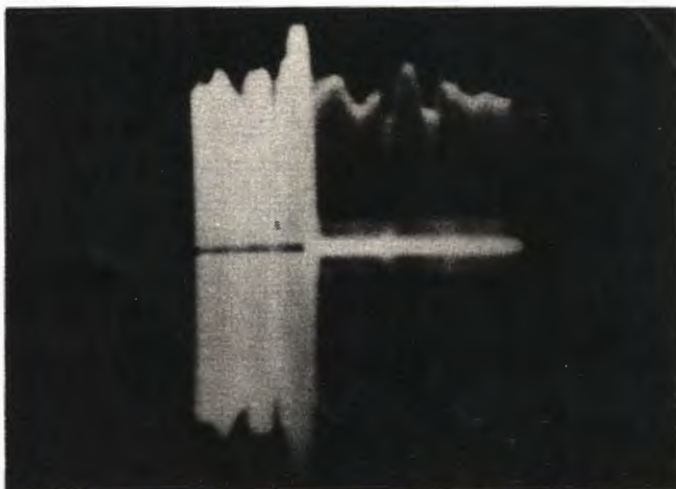


Рис.6. Осциллограмма начала срыва работы манипулятора №1 при незначительном увеличении скважности.

## II Схема тиратронного манипулятора (№2), выдающая импульс отрицательной полярности с крутым передним фронтом

Схема тиратронного манипулятора №2 и диаграммы его работы представлены на рисунках 7а и 8а,б,в,г,д. В отличие от манипулятора №1 в этой схеме лампа в.ч. генератора запирается при горении тиратрона  $T_2$  отрицательным смещением, создаваемым током плеча триггера на сопротивлении  $R_3$ . В связи с этим ток должен быть достаточно большим и мощность источника питания манипулятора возрастает. После переключения на тиратрон  $T_1$  отрицательное смещение с сопротивлением  $R_3$  снимается не сразу (см. рис.8г), а за счет тока емкости, протекающего через него, сначала удваивается и потом с постоянной времени  $\tau_2$  спадает до напряжения отсечки лампы  $U_T$  (точка 3" на рис.8г). В этой точке в.ч. генератор возбуждается, сопротивление  $R_{сксп}$  в проводящем состоянии генераторной лампы резко снижается, постоянная времени  $\tau_2$  уменьшается, отрицательное смещение, создаваемое емкостным током на сопротивлении  $R_3$ , спадает до нуля и генератор начинает нормально работать. В связи с задержкой снятия отрицательного смещения для возбуждения в.ч. генератора на частоте захвата необходимо сдвигать импульс управления тиратроном  $T_1$  в сторону опережения на величину этой задержки  $t_{зд}$ . С поступлением импульса  $U_2$  на тиратрон  $T_2$  триггер опять переключается и запирает генератор. Изменяя фазу поступления импульса  $U_2$ , можно управлять моментом запирающего в.ч. генератора.

После переключения с тиратрона  $T_1$  на  $T_2$  постоянная времени изменения напряжения на конденсаторе  $\tau_1 = CR_1$  (где  $R_1$  — сопротивление левого плеча триггера в омах), а напряжение на конденсаторе  $U_{с1}$  находится по формуле (1). На рисунке 8б показана эпюра изменения напряжения на конденсаторе при переключении с тиратрона  $T_1$  на  $T_2$ , а на рисунке 8а — диаграмма импульсов управления триггером.

Эквивалентная схема манипулятора №2 после переключения с тиратрона  $T_2$  на  $T_1$  показана на рисунке 7б. Постоянная времени  $\tau_2$  этой схемы определяется выражением (4), а напряжение на конденсаторе — формулой (5).

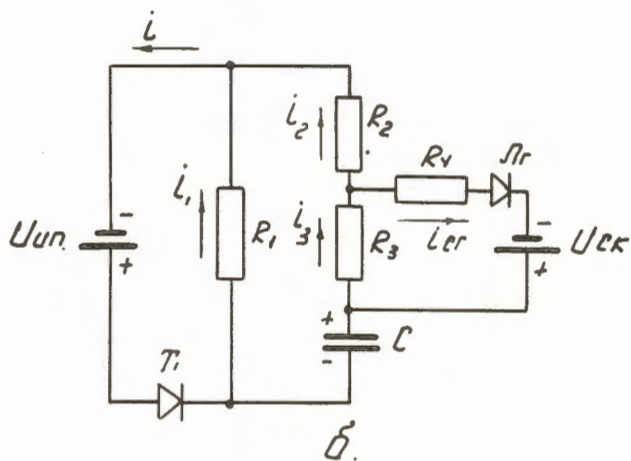
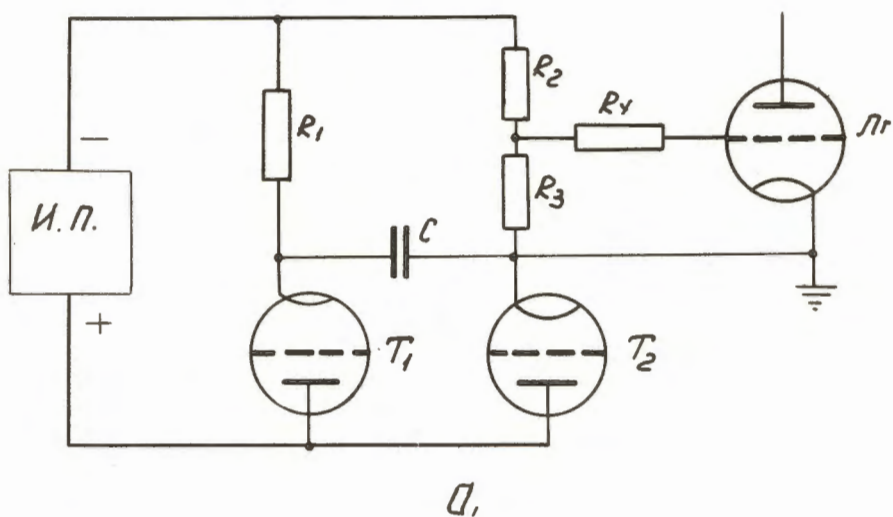


Рис.7. а - принципиальная схема манипулятора №2; б - эквивалентная схема манипулятора №2 после переключения с тиратрона  $T_2$  на  $T_1$ .

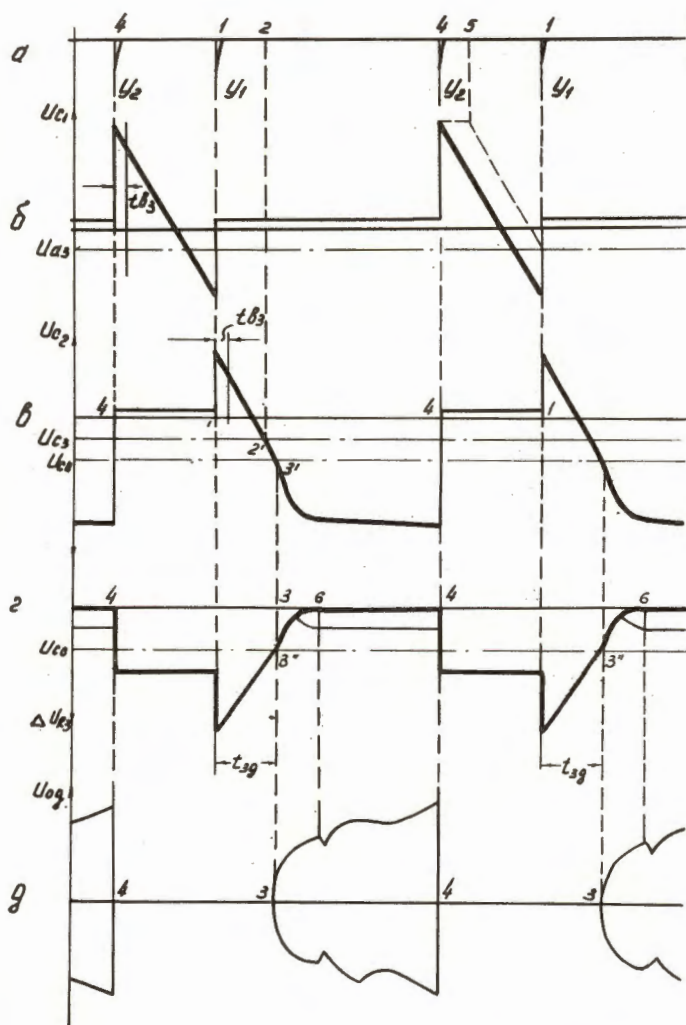


Рис.8. Диаграммы работы манипулятора №2; а - диаграмма управляющих импульсов; б - диаграмма изменения напряжения на конденсаторе после переключения с тиратрона  $T_1$  на  $T_2$  (толстая линия); в - диаграмма изменения напряжения на конденсаторе после переключения с тиратрона  $T_2$  на  $T_1$  (толстая линия); г - диаграмма изменения отрицательного смещения на сетке лампы в.ч. генератора, создаваемого на сопротивлении  $R_3$ ; тонкой линией показано напряжение, создаваемое при протекании сеточного тока возбужденного автогенератора через сопротивление  $R_3$ ; д - огибающая изменения амплитуды в.ч. напряжения на дуанте синхротрона;  $U_{\text{св}}$  - напряжение сеточной отсечки лампы в.ч. генератора.



$$r_2 = C(R_2 + R_3 - \frac{R_3^2}{R_3 + R_4 + R_{СК}}) \quad (4)$$

$$U_{C_2} = U_{СН} e^{-\frac{t}{r_2}} - (U_{ИП} - \frac{U_{СГ} R_3}{R_3 + R_4 + R_{СК}})(1 - e^{-\frac{t}{r_2}}), \quad (5)$$

где  $U_{C_2}$  — напряжение на конденсаторе;

$U_{СН}$  — начальное напряжение на конденсаторе;

$U_{ИП}$  — напряжение источника питания;

$U_{СГ}$  — напряжение автоматического смещения в.ч. генератора, определяемое по осциллограмме;

$r_2$  — постоянная времени изменения напряжения на конденсаторе для правого плеча триггера в сек;

$C$  — емкость переключающего конденсатора;

$R_2, R_3, R_4, R_{СК}$  — сопротивления, входящие в правое плечо триггера, кроме того,  $R_3$  и  $R_4$  входят в сопротивление гридлика;

$R_{СК}$  — сопротивление сетка-катод лампы генератора;

$t$  — время.

Если имеется осциллограмма тока в.ч. генератора  $i_{СГ}$ , то для нахождения  $U_{C_2}$  можно пользоваться формулой (5')

$$U_{C_2} = U_{СН} e^{-\frac{t}{r_2}} - (i_{СГ} R_3) (1 - e^{-\frac{t}{r_2}}). \quad (5')$$

На рис 8в показана эпюра изменения напряжения на конденсаторе при переключении с тиратрона Т2 на Т<sub>1</sub>. Как видно из рисунка 8, постоянная времени  $r_2$  в период восстановления запирающего действия сетки тиратрона  $t_{В.З.}$  имеет достаточно большую величину и уменьшается только после возбуждения в.ч. генератора (спустя время  $t_{ЭД}$ ). На рисунках 8а,б,в показан интервал времени 2-5, внутри которого, при измене-

нии фазы управляющего импульса  $U_2$ , критическая постоянная времени триггера  $t_{k \max} < t_1, t_2$ , что позволяет в этом интервале получить устойчивую работу триггера.

Схема манипулятора №2 надежно работает при форсированном режиме в.ч. генератора, со скажностью манипуляции от  $\infty$  до 1,5.

Рассмотренная схема имеет и ряд серьезных недостатков, мешающих ее применению для управления в.ч. генератором синхроциклотрона.

Во-первых, применение манипулятора №2 обязывает иметь на блоке управления синхроциклотроном /6/ регулировку фазы "включающего импульса" (импульса управления тиратроном  $T_1$ ) в сторону опережения до 1,2 мсек.

Во-вторых, изменение сопротивления гридлика (сопротивление  $R_4$ ) для получения другого режима работы в.ч. генератора приводит к смещению момента начала возбуждения генератора (к сдвигу точек  $3'$ ,  $3''$  и  $3$  на рис. 8в,г,д). Это происходит по причине изменения постоянной времени  $t_2$  и вызывает необходимость подрегулирования фазы "включающего импульса" на блоке управления синхроциклотроном.

В-третьих, даже при большом сдвиге "включающего импульса" в сторону опережения (порядка 1 мсек) амплитуда в.ч. напряжения на дуанте на верхних частотах уменьшается за счет небольшого дополнительного смещения, создаваемого емкостным током на сопротивлении  $R_3$  (участок 3-6 на рис.8г и д). Это вызывает некоторое снижение интенсивности и требует для компенсации небольшого повышения анодного напряжения на генераторе.

### III Схема тиратронного манипулятора (№3), выдающая импульс отрицательной полярности с крутыми фронтами

Схема и диаграммы работы манипулятора №3 показаны на рисунках 9а и 10а,б,в,г,д. Эквивалентная схема после переключения с тиратрона  $T_1$  на  $T_2$  представлена на рис.9б. Как и в схеме манипулятора №2, в.ч. генератор запирается при горении тиратрона  $T_2$  отрицательным смещением

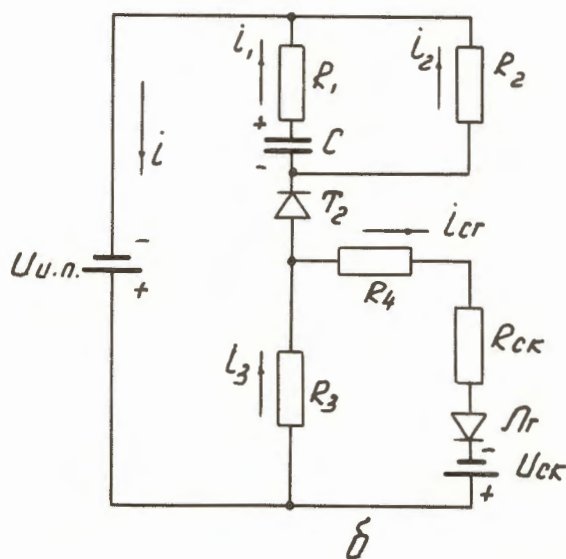
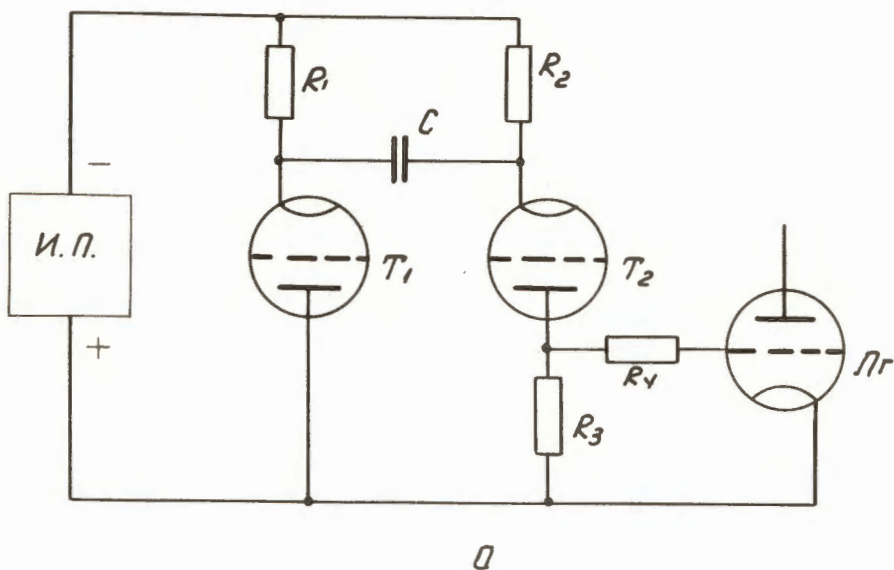


Рис.9. а - принципиальная схема манипулятора №3; б - эквивалентная схема манипулятора №3 после переключения с тиратрона  $T_1$  на  $T_2$ .

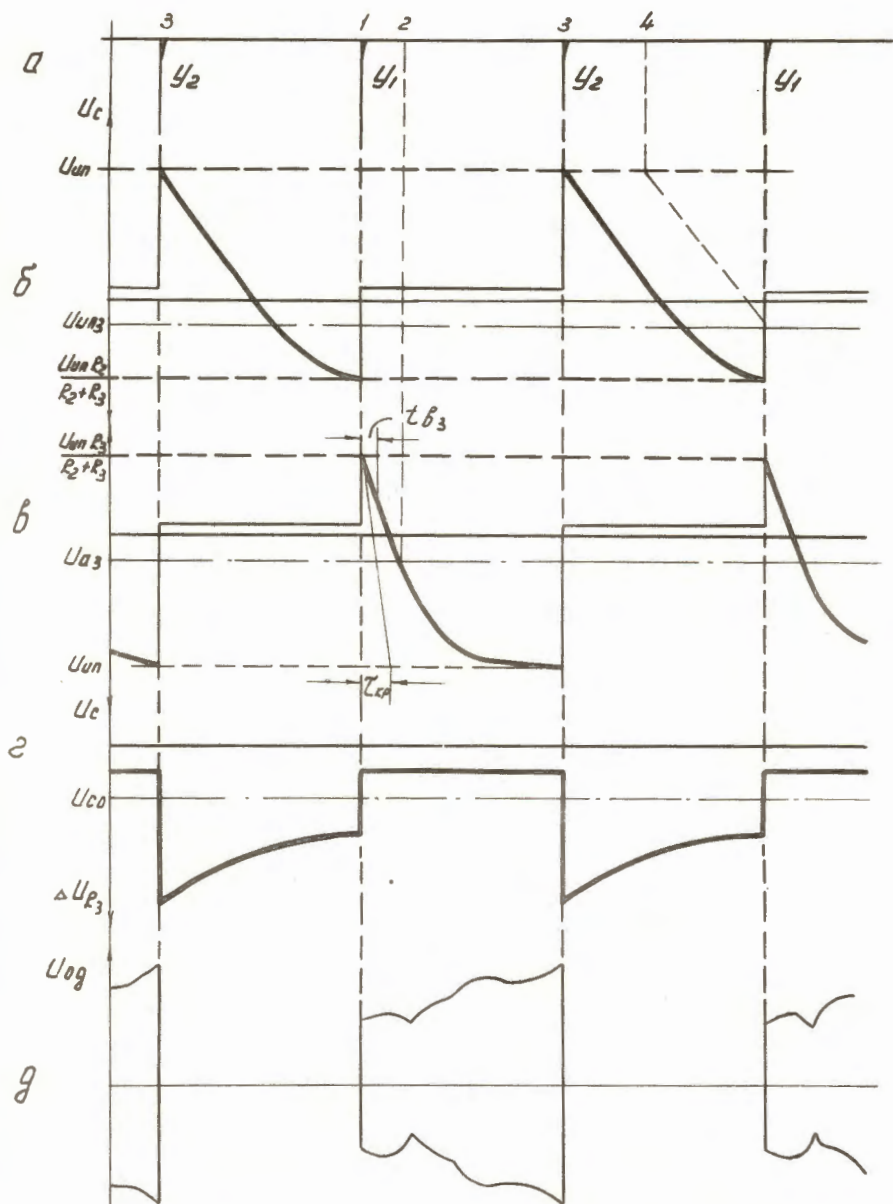


Рис.10. Диаграммы работы манипулятора №3; а - диаграмма импульсов управления манипулятором; б - изменение напряжения на конденсаторе (толстая линия) после переключения с тиратрона  $T_1$  на  $T_2$ ; в - диаграмма изменения напряжения на конденсаторе (толстая линия) после переключения с тиратрона  $T_2$  на  $T_1$ ; г - диаграмма изменения отрицательного смещения на сетке лампы в.ч. генератора, создаваемого на сопротивлении  $R_3$ ; д - огибающая изменения амплитуды в.ч. напряжения на дуанте синхrocиклотрона.

ем, создаваемым током плеча триггера на сопротивлении  $R_3$ , и поэтому мощность источника питания манипулятора №3 также значительна. После переключения на тиратрон  $T_1$  отрицательное смещение с сопротивления  $R_3$  без задержки снимается, поскольку цепь сопротивления  $R_3$  рвется тиратроном  $T_2$  и токи триггера через него не протекают. В.ч. генератор немедленно возбуждается. На рисунке 10в изображено изменение напряжения на конденсаторе после переключения с тиратрона  $T_2$  на  $T_1$ . Напряжение на конденсаторе в этом случае можно определить по формуле (6):

$$U_{c2} = U_{сн} e^{-\frac{t}{r_2}} - U_{ип} (1 - e^{-\frac{t}{r_2}}). \quad (6)$$

Здесь  $r_2 = CR_2$  — постоянная времени правого плеча триггера. Обозначение всех остальных величин давалось в предыдущих главах. На рисунке 10д показана диаграмма изменения напряжения на дуанте при работе в.ч. генератора.

При обратном переключении с тиратрона  $T_1$  на  $T_2$  в.ч. генератор запирается также без задержки, так как на сопротивлении  $R_3$  сразу возникает большое отрицательное смещение, создаваемое суммой тока плеча триггера и тока перезаряжающейся емкости. (См. рисунок 10г и д). За время горения тиратрона  $T_2$  конденсатор "С" перезаряжается с постоянной времени, определяемой выражением (7), а напряжение на конденсаторе находится по формуле (8):

$$r_1 = C \left( R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} \right); \quad (7)$$

$$U_{c1} = U_{сн} e^{-\frac{t}{r_1}} - \frac{U_{ип} R_2}{R_2 + R_3} (1 - e^{-\frac{t}{r_1}}). \quad (8)$$

В расчетные формулы (7) и (8) не вошли сопротивления  $R_4$  и  $R_{СК}$ , а также сеточный ток  $i_{СГ}$  и напряжение автоматического смещения генератора " $U_{СК}$ " (см. схему 9б). Это объясняется тем, что при поджигании тиратрона  $T_2$  в.ч. генератор сразу запирается создаваемым отрицательным смещением на  $R_3$ ,  $R_{СК}$  становится очень большим и им можно пренебречь, а в запертом состоянии лампы генератора можно считать  $i_{СК} = 0$ ,  $U_{СК} = 0$ .

На рис.10б показано изменение напряжения на конденсаторе после переключения с тиратрона  $T_1$  на  $T_2$ . На рисунке 10а,б,в, показан интервал времени 2-4, в котором  $t_{к max} < t_1, t_2$ . В этом интервале можно изменить фазу импульса управления  $U_2$ , и триггер будет устойчиво работать. Интервал можно несколько расширить, сделав  $t_1 = t_2 > t_{к max}$ .

Рассмотренная схема удовлетворяет всем основным требованиям, предъявляемым к манипулятору:

1. Работает надежно при любых форсированных режимах генератора и со скважностью манипуляции от 10 до 1,5, а при наличии на блоке управления синхроциклотроном /6/ регулировки фазы "включающего импульса" (импульса управления тиратроном  $T_1$ ) в сторону опережения порядка на 300 мксек может запирает в.ч. генератор в районе частоты захвата.

2. Благодаря крутому переднему и заднему фронтам импульса отрицательного смещения, получаемого на сопротивлении  $R_3$ , в.ч. генератор управляется четко, и амплитуда в.ч. напряжения на дуанте не имеет завалов или выбросов на верхних и нижних частотах.

На осциллограмме (рис.11) показан отрицательный импульс напряжения, возникающий на сопротивлении  $R_3$ , при работе манипулятора №3 с отключенной сеточной цепью в.ч. генератора.

На следующей осциллограмме (рис.12) показано: в первой части периода - огибающая сеточного тока возбужденного генератора, во второй части периода - импульс отрицательного смещения на сопротивлении  $R_3$ , который запирает генератор.

На рис.13 приведена осциллограмма огибающей амплитуды в.ч. напряжения на дуанте при работе манипулятора №3 и скважности манипуляции - 2.

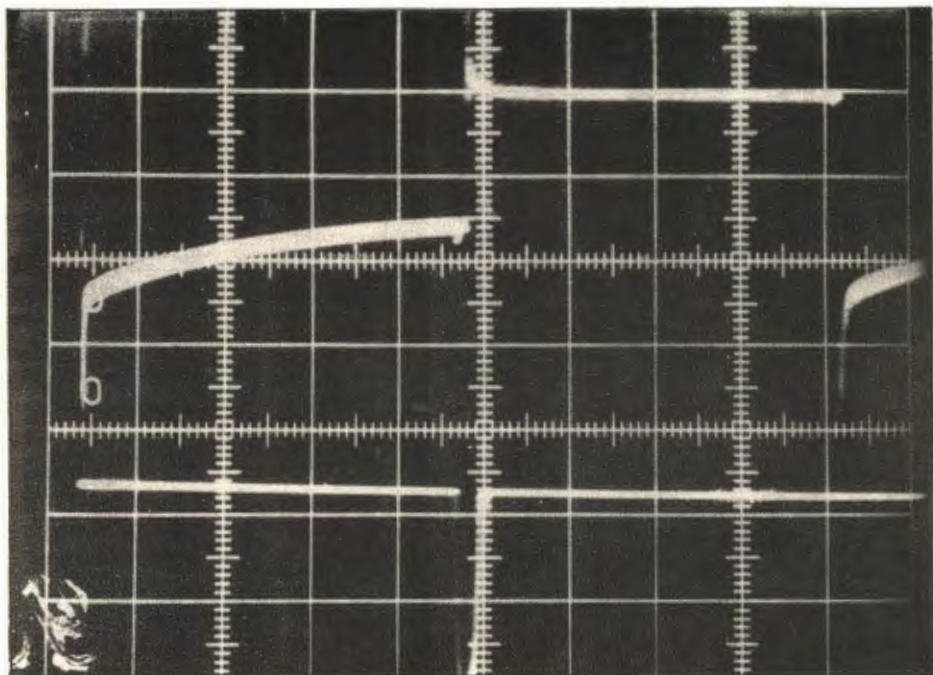


Рис.11. Осциллограмма отрицательного импульса напряжения, возникающего на сопротивлении  $R$ , при работе манипулятора №3 (верхний луч); на нижнем луче - импульс управления тиратроном  $T_1$ . Развертка 1 мсек/см.

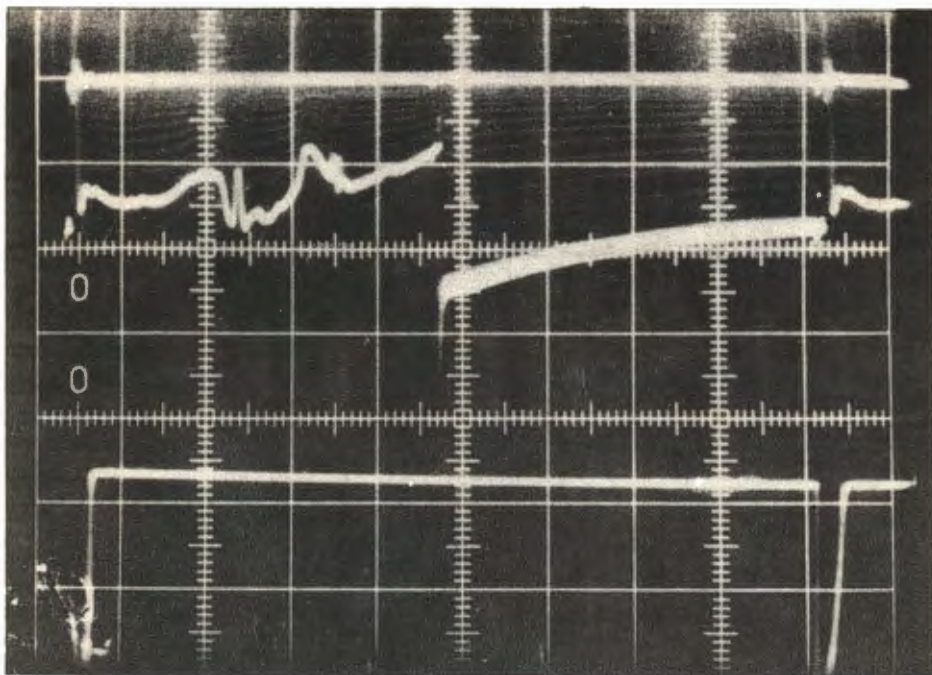


Рис.12. Осциллограмма изменения напряжения на сопротивлении  $R_3$  манипулятора №3. В первой части периода показан сеточный ток возбужденного генератора, во второй части — импульс отрицательного смещения на сопротивлении  $R_3$ , который запирает в.ч. генератора. На нижнем луче показан импульс управления тиратроном  $T_1$  ("включающий импульс").



На осциллограмме (рис.14) показана та же огибающая, но при скважности манипуляции 8. Осциллограмма (рис.14) снята при форсированном режиме в.ч. генератора.

Недостатком всех тиратронных манипуляторов является то, что ввиду большого времени восстановления запирающего действия сеток тиратронов ( $100+250$  мксек) нельзя получить манипуляцию со значительно более высокой частотой (в  $10+20$  раз), чем рабочая частота манипуляции синхротрона (порядке 120 герц). Значительное увеличение частоты манипуляции необходимо для осуществления специальных экспериментальных режимов ускорителя.

### Заключение

Подводя итог проделанной работе, можно отметить следующие наиболее важные результаты:

1. На основе анализа работы тиратронного триггера предложен способ ориентировочного определения диапазона изменения критической постоянной времени триггера при глубоком регулировании фаз управляющих импульсов.

2. Проведены исследования трех схем тиратронного манипулятора и сделаны выводы по каждой схеме.

3. Предложена, испытана и введена в длительную эксплуатацию схема тиратронного манипулятора №3, удовлетворяющая всем основным требованиям, предъявляемым к манипулятору синхротрона.

4. Установлено, что для значительного увеличения частоты манипуляции ( $10+20$  раз) и получения устойчивой работы манипулятора при изменении фазы "отключающего импульса" (импульса управления тиратроном  $T_1$  - для схемы №1 или тиратроном  $T_2$  - для схемы №2 и №3) в интервале почти всего периода модуляции ускоряющей частоты необходимо в триггерных схемах вместо тиратронов применять тиристоры, имеющие малые времена переключения (порядка 20 мсек).

Авторы считают приятным долгом выразить благодарность А.Н.Булатову, В.И.Иванову, Ю.В.Максимову, В.Ф.Мицыну и А.И.Сысоеву за учас-

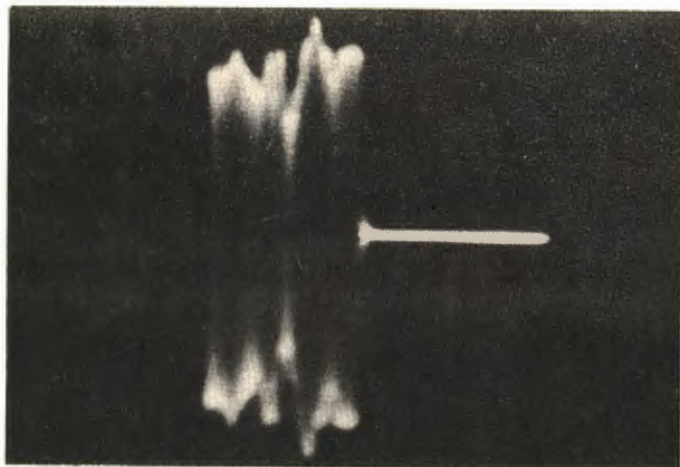


Рис.13. Осциллограмма огибающей амплитуды в.ч. напряжения на дуанте синхроциклотрона при работе манипулятора №3 со скважностью манипуляции 2.

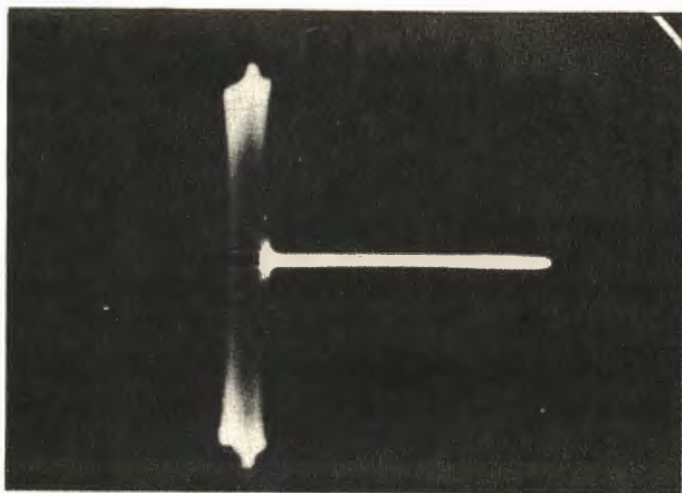


Рис.14. Осциллограмма огибающей амплитуды в.ч. напряжения на дуанте синхроциклотрона при работе манипулятора №3 со скважностью манипуляции 8.

тие в монтаже и испытаниях новых схем манипуляторов, а также В.И.Данилову, и А.И.Смирнову за интерес, проявленный к работе.

#### Л и т е р а т у р а

1. Д.В.Ефремов, М.Г.Мешеряков, А.А.Мицц и др. Атомная энергия №4, стр. 5-12, 1956 г.
2. И.Л.Каганов "Электронные и ионные преобразователи" часть 2. Госэнергоиздат 1955 г.
3. Л.Р.Нейман и П.Л.Калантаров "Теоретические основы электротехники", Часть II . Госэнергоиздат 1959 г.
4. В.И.Данилов, И.Б.Енчевич, Е.И.Розанов, В.И.Смирнов, Т.Н. Томилина. Препринт ОИЯИ Р-2281, 1965 г.
5. В.И.Данилов, И.Б.Енчевич, М.М.Кулюкин, Э.А.Полферов, Т.Н.Томилина. Препринт ОИЯИ Р-2811, Дубна 1966 г.
6. В.И.Данилов, И.Б.Енчевич, Е.И.Розанов, Т.Н.Томилина, А.В.Шестов. ПТЭ, №3, стр. 19-22; 1966 г.
7. А.Л.Мицц, И.Х.Невяжский, Б.И.Поляков. Радиотехника и электроника №7, стр. 3-12, 1956 г.

Рукопись поступила в издательский отдел  
11 мая 1968 года.