

Ц 76
Б-447

1455/2-77

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



18/10-77

9 - 10313

А.П.Беляев, Б.Г.Горинов, Г.В.Долбилов,
А.Д.Коваленко, А.И.Ладыгин, А.П.Сумбаев,
А.А.Фатеев

ИССЛЕДОВАНИЕ ПУСКОВЫХ И КОММУТАЦИОННЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК ТИРАТРОНОВ ТГИ1-2500/50
МОДУЛЯТОРОВ УСКОРИТЕЛЯ СИЛУНД

1976

9 - 10313

А.П.Беляев, Б.Г.Горинов, Г.В.Долбилов,
А.Д.Коваленко, А.И.Ладыгин, А.П.Сумбаев,
А.А.Фатеев

ИССЛЕДОВАНИЕ ПУСКОВЫХ И КОММУТАЦИОННЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК ТИРАТРОНОВ ТГИ1-2500/50
МОДУЛЯТОРОВ УСКОРИТЕЛЯ СИЛУНД

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Беляев А.Л. и др.

9 - 10313

Исследование пусковых и коммутационных характеристик тиратронов ТГИ-2500/50 модуляторов ускорителя СИЛУНД

Анализируется опыт эксплуатации группы тиратронов ускорителя СИЛУНД, исследуется влияние режимов работы накала катода, накала генератора водорода и сеточного смещения на величину и периодическую нестабильность времени зажигания, а также периодическую нестабильность фронта импульса на нагрузке тиратронов ТГИ1-2500/50. Результаты позволяют синхронизировать модуляторы ускорителя с точностью не хуже ± 1 нс и осуществить управление ускорителем от ЭВМ.

Работа выполнена в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований
Дубна 1976

О необходимости сокращения и стабилизации времени зажигания мощных водородных тиратронов неоднократно указывалось в работах по ускорительной технике и радиоэлектронике больших мощностей. В работах /1-5/ исследованы пусковые характеристики различных типов мощных водородных тиратронов. Показано, что при выборе оптимальных режимов работы накала катода и накала генератора водорода тиратронов /1,2/, а также при соответствующем подборе параметров запускающего импульса /1,2,5/ можно сократить время зажигания тиратронов до $80 \div 120$ нс.

В процессе эксплуатации ускорителя СИЛУНД /6/, использующего в качестве коммутирующих элементов модуляторов тиратроны ТГИ1-2500/50, установлено, что стабильность параметров высоковольтного импульса ускоряющего напряжения на индукторах существенно зависит от стабильности работы коммутирующих элементов, которую можно характеризовать следующими величинами: $\Delta \tau_3$ - нестабильность времени зажигания; $\Delta \tau_{\phi}$ - нестабильность длительности фронта импульса напряжения на входе обостряющих линий.

Обе величины могут иметь как апериодический, так и периодический /от импульса к импульсу/ характер изменения.

Пользуясь известными рекомендациями /1-5/, можно сократить $\Delta \tau_3$ до величины меньше чем 1 нс, тогда нестабильность импульса ускоряющего напряжения будет определяться величиной $\Delta \tau_{\phi}$.

В настоящей работе анализируется опыт эксплуатации группы тиратронов ускорителя СИЛУНД, исследуется влияние режимов работы накала катода и накала

генератора водорода, а также режимов сеточного смещения на величину и периодическую нестабильность времени зажигания и фронта импульса напряжения на нагрузке тиратронов ТГИ1-2500/50. Поэтому в дальнейшем мы опускаем слово "периодический", хотя будем иметь в виду именно этот характер изменения указанных величин.

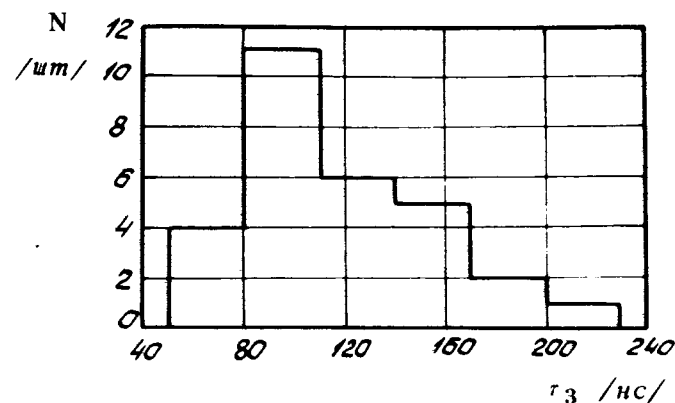
Высоковольтная импульсная система ускорителя СИЛУНД на первом этапе наладки и эксплуатации содержала 24 тиратрона ТГИ1-2500/50 ^{/7/}. Затем при установке пятой дополнительной секции к импульсной системе были подключены еще четыре модулятора с новыми экземплярами тиратронов. В процессе эксплуатации часть из 24 первоначально установленных тиратронов была заменена. Таким образом, в данной работе исследовались как новые экземпляры тиратронов, так и тиратроны, проработавшие на ускорителе в течение двух лет в режимах, отличающихся от паспортных по некоторым параметрам. Условия эксплуатации тиратронов следующие ^{/6,7/}:

- величина зарядного напряжения - 40-50 кВ,
- амплитудное значение анодного тока в импульсе - 10 кА,
- длительность импульса анодного тока - 100 нс.

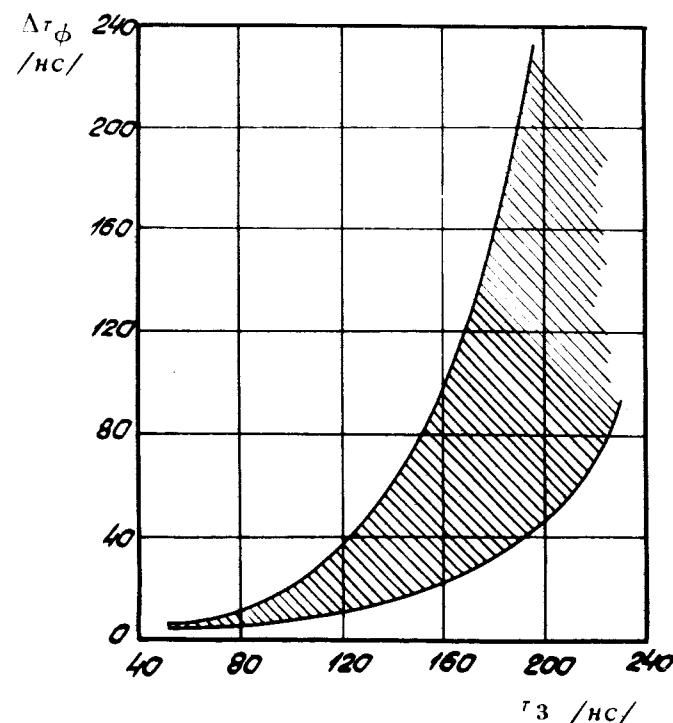
Имелась возможность использовать положительное смещение на сетке тиратронов с током смещения 5 ± 10 мА.

Запуск тиратронов осуществлялся от генератора запуска через импульсный трансформатор импульсом напряжения с амплитудой 2 кВ и фронтом 100 нс. Величина времени зажигания измерялась по задержке импульса напряжения на нагрузке /на уровне 0,1 амплитуды/ относительно запускающего сигнала. Длительность фронта импульса напряжения на нагрузке измерялась на уровне $0,1 \pm 0,9$ амплитудного значения.

На рис. 1а приводится гистограмма времени зажигания 28 тиратронов ускорителя, соответствующая моменту начала исследований. При измерении времени зажигания на всех тиратронах были установлены паспортные значения напряжения накала катода $U_H = 6,3$ В



а/



б/

Рис. 1

и тока накала генератора водорода $I_{ГВ} = 2,6$ А. Положительное смещение отсутствовало. При измерении нестабильности времени зажигания и длительности фронта анодного тока при тех же условиях оказалось, что нестабильность длительности фронта анодного тока значительно превышает нестабильность времени зажигания. На *рис. 1б* показан диапазон величин $\Delta\tau_{\phi}$ тиратронов, соответствующих гистограмме на *рис. 1а*. Для наглядности по оси абсцисс *рис. 1а* и *1б* имеют одинаковый масштаб времени зажигания τ_3 .

Следует отметить, что величина времени зажигания у новых экземпляров тиратронов значительно превосходит /в $1,5 \div 2$ раза/ время зажигания тиратронов, бывших в эксплуатации и работавших в режиме сеточного смещения. Новый тиратрон после эксплуатации с сеточным смещением в течение $1 \div 3$ мес. уменьшает время зажигания даже при отключении положительного смещения.

В работах ^{/4,5/} показано, что при эксплуатации тиратронов без положительного сеточного смещения наблюдалось увеличение времени зажигания.

ВЛИЯНИЕ НАКАЛА КАТОДА И НАКАЛА ГЕНЕРАТОРА ВОДОРОДА

Известно ^{/3,5/}, что основными факторами, определяющими время развития разряда тиратрона /время зажигания/, являются эмиссионная способность катода и давление водорода в колбе тиратрона, которые, в свою очередь, определяются напряжением накала катода и током накала генератора водорода.

Опыт двухлетней эксплуатации большой группы тиратронов ТГИ1-2500/50 показал, что все экземпляры, работавшие в режимах U_H , $I_{ГВ}$, указанных в технической документации, проработали время, значительно превышающее гарантируемое заводом-изготовителем /2000 ч./. После значительного превышения ресурса времени пусковые и коммутационные характеристики тиратронов постепенно ухудшаются и для поддержания

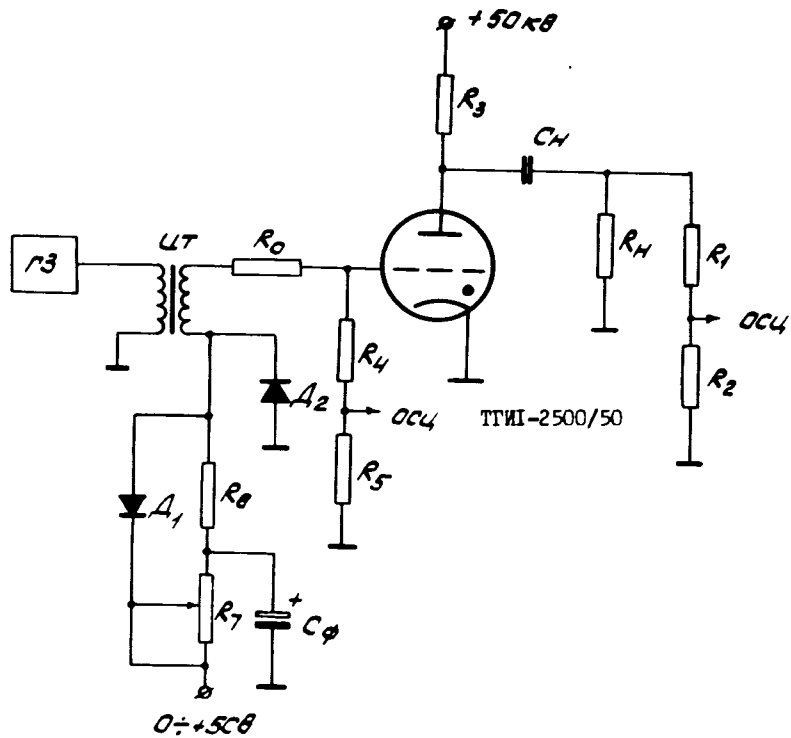
работоспособности ускорителя требуется замена отработавших тиратронов. Однако при некотором изменении напряжения накала катода и тока накала генератора водорода тиратроны способны улучшить свои характеристики.

Для комплексного исследования влияния напряжения накала катода и величины тока накала генератора водорода на величину времени зажигания τ_3 , нестабильность времени зажигания $\Delta\tau_3$, нестабильность длительности фронта импульса напряжения на нагрузке $\Delta\tau_{\phi}$, была применена схема, представленная на *рис. 2*, с использованием в качестве нагрузки активного сопротивления, составленного из резисторов ТВО-60. Применялось отдельное питание накала катода и накала генератора водорода стабилизированными источниками. Стабильность напряжения накала катода составляла $\pm 1\%$, стабильность тока накала генератора водорода была лучше $0,5\%$. Геттерный насос включался параллельно накалу катода. При этом контролировались напряжение накала катода и ток накала генератора водорода.

Поскольку измерениями установлено, что характер указанных зависимостей не изменяется при изменении величины R_H , все приведенные ниже результаты даются для одного значения $R_H = 8$ Ом.

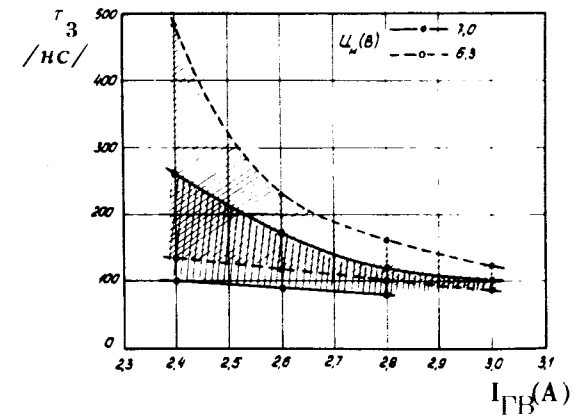
На *рис. 3* приведены области изменения коммутационных характеристик 28 тиратронов ускорителя при отключенном сеточном смещении. На *рис. 3а* представлены области изменения времени зажигания τ_3 от величины тока накала генератора водорода $I_{ГВ}$ для различных значений напряжения накала катода U_H . Измерения нестабильности времени зажигания $\Delta\tau_3$ показали, что в широком диапазоне величин токов накала генераторов водорода и напряжений накала катодов $\Delta\tau_3$ не превышает 1 нс и в интересном в практическом отношении режимах питания тиратронов не оказывает существенного влияния на стабильность импульсов на выходе схемы.

На *рис. 3б* представлена область наблюдаемых длительностей фронта импульсов напряжения на нагрузке τ_{ϕ} , а на *рис. 3в* - область нестабильностей длительности фронта в зависимости от тока накала генератора

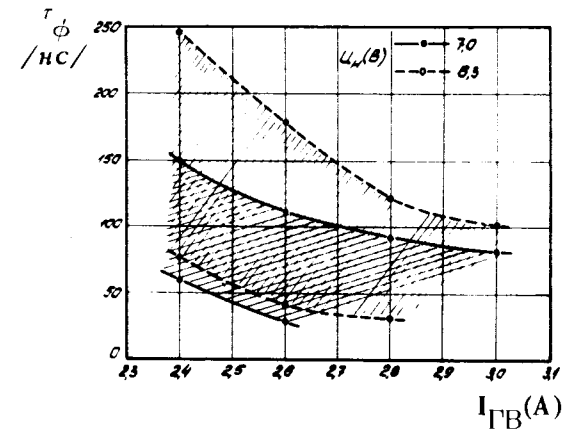


- R_1/R_2 , R_4/R_5 - делители,
 R_3 - зарядное сопротивление,
 R_0 - ограничивающее сопротивление,
 R_H - нагрузка,
 C_H - накопительная емкость,
 $ГЗ$ - генератор запуска,
 $ИТ$ - импульсный трансформатор,
 R_6-R_7 - регулятор смещения,
 $C_Ф$ - фильтрующая емкость,
 $Д_1, Д_2$ - диоды,
 осц - выход на осциллограф.

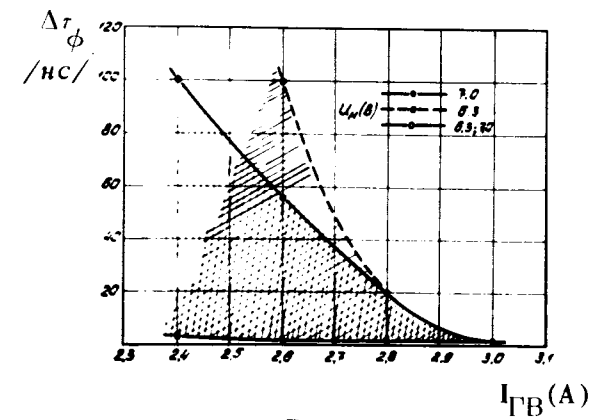
Рис. 2



а/



б/



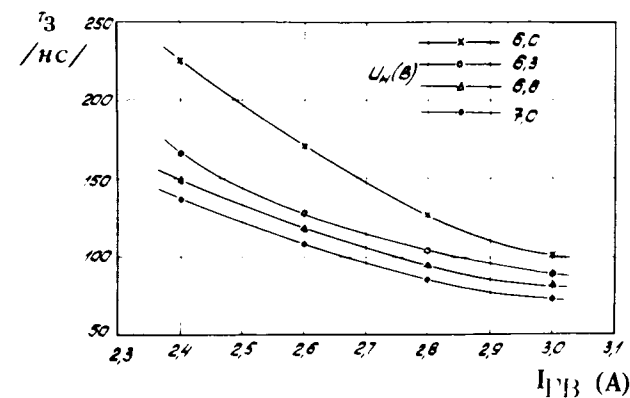
в/

Рис. 3

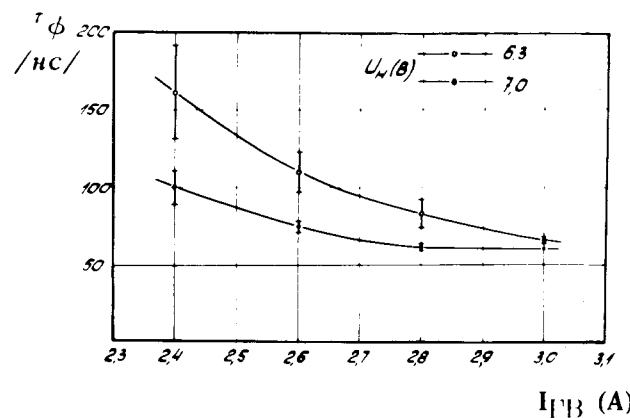
водорода и напряжения накала катода. Из рисунков видно, что при паспортных значениях $I_{ГВ} = 2,6 \text{ А}$, $U_H = 6,3 \text{ В}$ имеется значительный разброс длительности и стабильности фронта для различных экземпляров тиратронов ускорителя после двух лет эксплуатации. Однако практически для всех тиратронов увеличением напряжения накала катода до $6,6 \div 7,0 \text{ В}$ и подбором тока генератора водорода в пределах $2,4 \div 2,8 \text{ А}$ можно уменьшить длительность фронта импульса напряжения до $50 \div 70 \text{ нс}$, а нестабильность длительности фронта до величины, меньшей чем 2 нс .

На рис. 4 представлены коммутационные характеристики отдельного тиратрона, работающего на активную нагрузку $R_H = 8 \text{ Ом}$ при отключенном сеточном смещении в зависимости от величины тока накала генератора водорода для различных значений величины напряжения накала катода. Из рис. 3,4 видно, что влияние тока накала генератора водорода /т.е. плотности газа в колбе тиратрона/ на время зажигания и коммутационные характеристики тиратрона более существенно, чем напряжение накала катода. В то же время значительное снижение тока накала генератора водорода быстро переводит тиратрон в неустойчивый режим работы с увеличенным временем коммутации и плохой стабильностью фронтов.

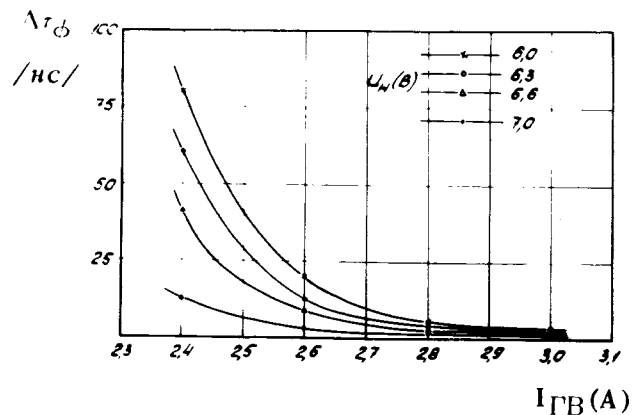
На рис. 5 представлены осциллограммы импульса напряжения на нагрузке при различных значениях тока накала генератора водорода для $U_H = 6,3 \text{ В}$ /а - $I_{ГВ} = 2,4 \text{ А}$; б - $I_{ГВ} = 2,8 \text{ А}$; в - $I_{ГВ} = 3,0 \text{ А}$, длительность развертки - 50 нс/см /. Из осциллограмм видно, что при уменьшении давления водорода в колбе нарушается монотонный характер нарастания напряжения на нагрузке, и что, как отмечено в работе 5, на переднем фронте импульса появляется "ступенька", связанная, по всей видимости, с тем, что первоначально быстрый рост тока электронов в тиратроне превосходит скорость образования плазмы в колбе и приводит к запиранию анодного тока собственным пространственным зарядом. В условиях недокомпенсации пространственного заряда электронов ионами плазмы нарастание тока происходит неустойчиво, что проявляется в увеличении нестабиль-



а/

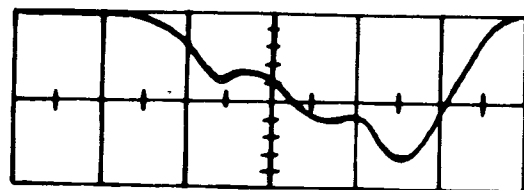


б/

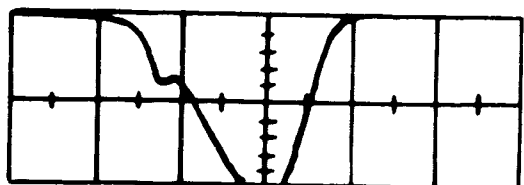


в/

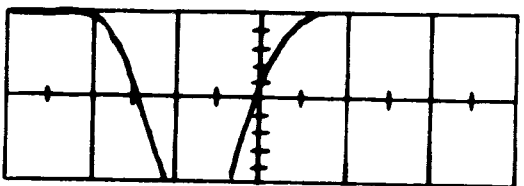
Рис. 4



а/



б/



в/

Развертка - 50 нс/см.

а - $I_{ГВ} = 2,4$ А

б - $I_{ГВ} = 2,8$ А

в - $I_{ГВ} = 3,0$ А.

Рис. 5

ности фронта импульса напряжения. При увеличении тока накала генератора водорода и, следовательно, давления газа в колбе скорость образования плазмы увеличивается пропорционально плотности, крутизна нарастания тока в тиратроне растет, "ступенька" на фронте импульса напряжения на нагрузке исчезает, а стабильность фронта значительно улучшается.

Наличие характерной "ступеньки" на переднем фронте импульса напряжения на нагрузке тиратрона можно использовать для диагностики состояния тиратрона по давлению водорода в колбе. При ухудшении стабильности работы модуляторов ускорителя можно без существенного изменения схемы установить, связано ли это ухудшение с работой тиратрона. Появление ступеньки на фронте напряжения указывает на необходимость улучшения режима работы генератора водорода тиратрона.

ВЛИЯНИЕ ПОЛОЖИТЕЛЬНОГО СЕТОЧНОГО СМЕЩЕНИЯ

Согласно рекомендациям работы ^{14/}, с целью уменьшения времени зажигания тиратронов на ускорителе СИЛУНД предусмотрена возможность использования положительного сеточного смещения. Величина смещения на сетке тиратрона регулировалась в пределах 0 ± 50 В. На рис. 6 приводится типовая вольт-амперная характеристика тлеющего разряда между катодом и сеткой тиратрона. В процессе исследования изучалось влияние положительного смещения на пусковые и коммутационные характеристики тиратронов для 3-4 значений тока смещения, соответствующих пологой части вольт-амперной характеристики. При переводе тлеющего разряда на крутосходящую ветвь характеристики, соответствующую началу пробоя, тиратроны, как правило, открываются и переходят в проводящее состояние.

Как и в работе ^{14/}, даже небольшой ток, протекающий в цепи сетки при положительном смещении, позволяет сократить время зажигания тиратрона. На рис. 7а представлен диапазон изменения пусковых характеристик при включении смещения с током $I_{СМ} = 6,0$ мА для группы тиратронов ускорителя /28 тиратронов/ для различных токов накала генератора водорода при напряжении накала катода 6,3 В. Из рисунка можно видеть, что уже при токе накала генератора водорода 2,6 А и выше время зажигания тиратронов сокращается до величины не более 160 нс.

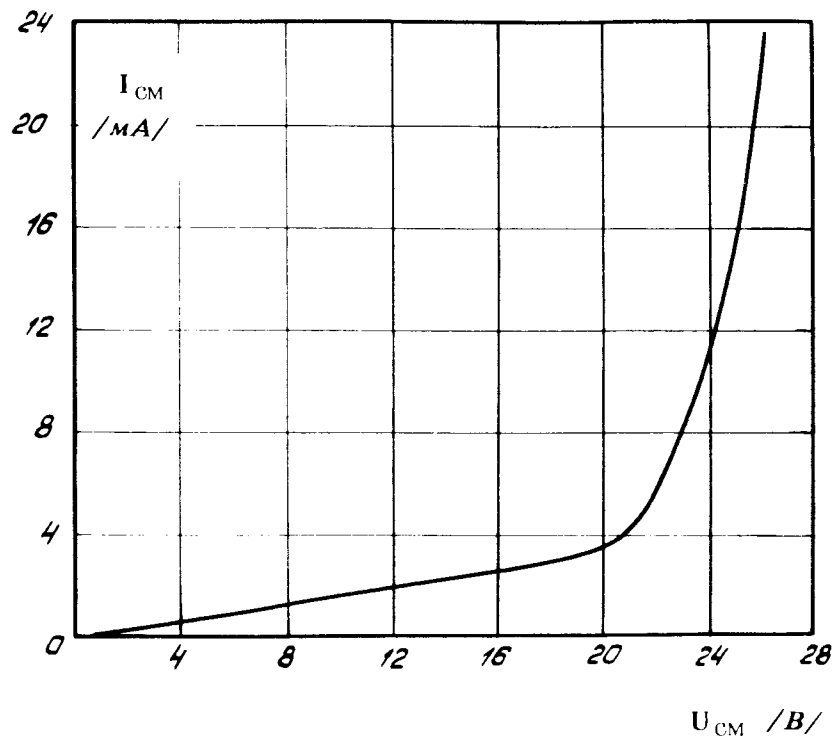
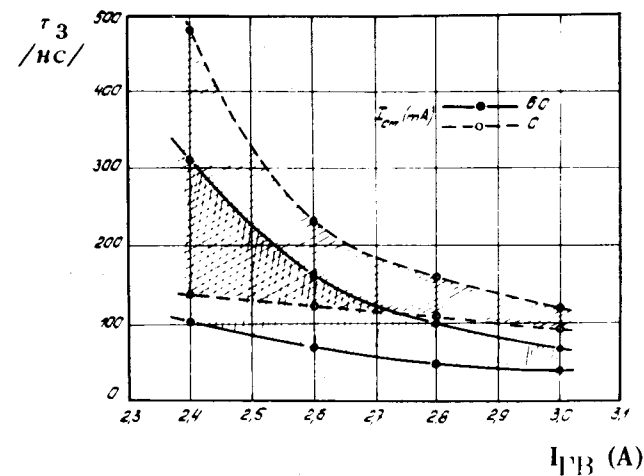


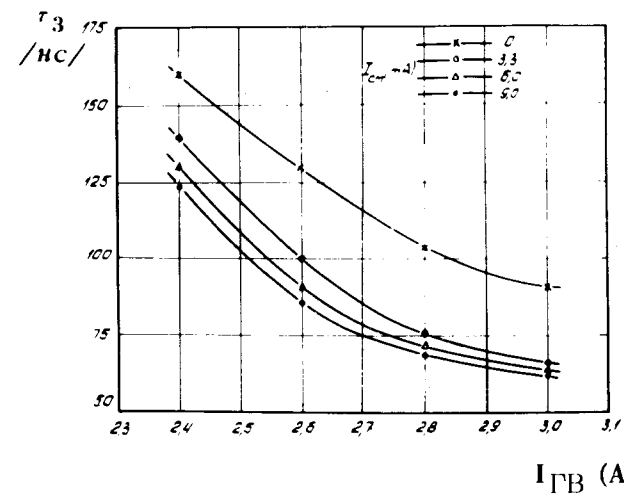
Рис. 6

На рис. 76 представлены пусковые характеристики отдельного тиратрона в зависимости от тока накала генератора водорода для различных значений величины тока смещения при напряжении накала катода 6,3 В. Из рисунка следует, что изменением величины тока смещения в цепи сетки можно в небольших пределах регулировать величину времени зажигания тиратрона.

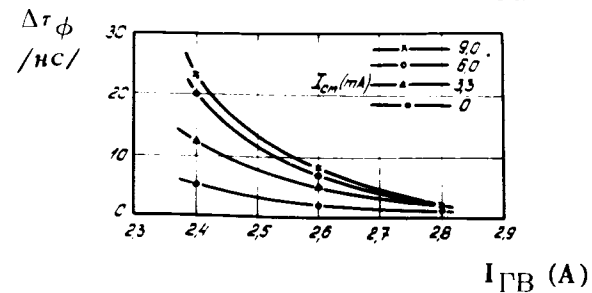
При изучении влияния сеточного смещения на коммутационные характеристики тиратрона было установлено, что положительное сеточное смещение мало влияет на величину фронта импульса напряжения на нагрузке тиратрона. Стабильность фронта импульса напряжения на нагрузке при этом не улучшается, а в отдельных случаях



а/



б/



в/

Рис. 7

становится хуже. Для изучения влияния смещения были отобраны два тиратрона, обладающие соответственно наилучшими и наихудшими пусковыми и коммутационными характеристиками. При этом в качестве контрольных параметров анализировались величины τ_3 , τ_ϕ , $\Delta\tau_\phi$. При включении положительного сеточного смещения на сетку тиратрона, обладающего худшими характеристиками $\tau_3 = \tau_{3 \max}$, $\tau_\phi = \tau_{\phi \max}$, $\Delta\tau_\phi = \Delta\tau_{\phi \max}$, время зажигания сокращалось на $100 \div 200$ нс, а величины τ_ϕ и $\Delta\tau_\phi$ оставались без изменения. Влияние сеточного смещения на пусковые и коммутационные характеристики тиратрона, обладающего наилучшими параметрами $\tau_3 = \tau_{3 \min}$, $\tau_\phi = \tau_{\phi \min}$, $\Delta\tau_\phi = \Delta\tau_{\phi \min}$ при напряжении накала катода $U_H = 6,3$ В, представлено на рис. 7б и 7в. Величина длительности фронта импульса напряжения на нагрузке тиратрона изменялась незначительно, лишь в пределах нестабильности. На рис. 8 представлено влияние сеточного смещения на стабильность фронта импульса напряжения на нагрузке тиратрона, обладающего наибольшей чувствительностью нестабильности $\Delta\tau_\phi$ к положительному смещению при напряжении накала катода 6,3 В. Из рис. 7,8 видно, что включение смещения на сетке тиратрона ТГИ1-2500/50 сокращает время зажигания, но ухудшает стабильность фронта импульса напряжения.

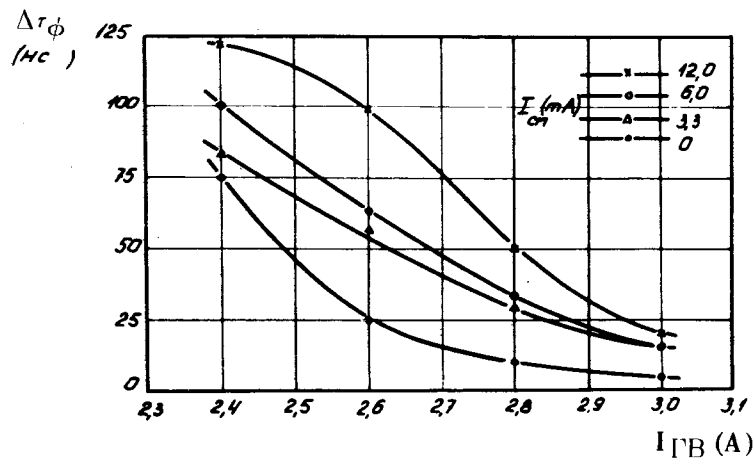


Рис. 8

Это ухудшение стабильности фронта, по всей видимости, можно связать с проникновением отдельных порций плазмы тлеющего разряда в пространство между главными электродами тиратрона. Данные, приведенные на рис. 7,8, позволяют утверждать, что при увеличенных значениях тока накала генератора водорода отрицательное влияние сеточного смещения можно частично устранить, что, однако, возможно не для всех тиратронов, так как отдельные экземпляры их при столь значительном увеличении тока накала генератора водорода переходят в проводящее состояние.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты измерений, проведенных в рамках данной работы, не противоречат результатам работ [1,2,4,5] и позволяют сделать следующие выводы:

1. Нестабильность импульса напряжения на индукторах модуляторов ускорителя определяется, в основном, нестабильностью фронта импульса напряжения на входе в обостряющие линии модуляторов и может быть улучшена путем индивидуального подбора режимов работы накала катода и накала генератора водорода, а при общем параллельном питании накалов группы тиратронов - режимов работы генераторов водорода.

2. Применение положительного сеточного смещения сокращает время зажигания тиратронов ТГИ1-2500/50, но в отдельных случаях приводит к ухудшению стабильности фронта импульса напряжения на нагрузке. Поэтому включение положительного смещения на сетку тиратронов ускорителя СИЛУНД можно рекомендовать только для тиратронов, имеющих увеличенное время зажигания, когда его не удается сократить подбором тока накала генератора водорода.

3. При стабилизации напряжения накала не хуже 0,5% и стабильности тока накала генератора водорода

не хуже 0,5% возможно осуществление надежной синхронизации модуляторов ускорителя СИЛУНД с точностью не хуже ± 1 нс.

4. Применение рекомендованных в работе мер позволяет существенно снизить периодическую нестабильность импульса ускоряющего напряжения, а коррекцию аперiodической нестабильности производить при помощи управляющей ЭВМ.

В заключение авторы благодарят за помощь в работе персонал ускорителя СИЛУНД.

ЛИТЕРАТУРА

1. М.Ю. Гельцель, А.Д. Панфилов, С.С. Соболев, Л.И. Юдин. ПТЭ, №2, 1965.
2. В.А. Визирь и др. ПТЭ, №3, 1976.
3. Т.А. Ворончев. "Импульсные тиратроны", Москва, Сов. радио, 1958.
4. В.Д. Володин, П.С. Кузнецов, А.Т. Матюшин, В.Т. Матюшин. ОИЯИ, 1-6734, Дубна, 1972.
5. Т.Б. Фогельсон, Л.Н. Бреусова, Л.Н. Вагин. "Импульсные водородные тиратроны", Москва, Сов. радио, 1974.
6. Л.С. Барабаш и др. ОИЯИ, Р9-7697, Дубна, 1974.
7. В.Д. Гитт, А.Д. Коваленко, П.И. Рыльцев, В.П. Саранцев. ОИЯИ, Р9-5601, Дубна, 1971.

Рукопись поступила в издательский отдел
21 декабря 1976 года.