

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА**

13 85-306

С.А. Корнев, И.Б. Енчевич\*, М.К. Михов\*

**ГЕНЕРАТОР ИМПУЛЬСНОГО НАПРЯЖЕНИЯ  
ДЛЯ ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ПУШКИ**

Направлено в журнал "Приборы и техника эксперимента"

---

\* Институт ядерных исследований  
и ядерной энергетики БАН, София, НРБ

**1985**

## ВВЕДЕНИЕ

Для питания электронных пушек используются каскадные генераторы импульсного напряжения типа Аркадьева-Маркса, Фитча, генераторы с индуктивными накопителями энергии и с совмещенными емкостными и индуктивными накопителями энергии<sup>1</sup>.

При разработке генераторов импульсного напряжения /ГИН/ с индуктивным накопителем энергии основной проблемой является стабильное прерывание тока на довольно высокой частоте. Для прерывания тока используются взрывающиеся проволочки и фольги, таситроны, инжекционные тиратроны. Поэтому поиск управляемых прерывателей тока до сих пор представляется актуальным. Особенно это относится к разработке и созданию генераторов импульсного напряжения для питания электронных сильноточных пушек, формирующих низкоэнергетичные электроны /10÷30 кэВ/ из-за относительно большого энергозапаса<sup>2</sup>.

В данной работе приводятся результаты разработки такого генератора, в котором прерывающим элементом является водородный тиратрон, приводятся характеристики тиратрона, помещенного в магнитное поле короткой магнитной линзы.

### 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОДОРОДНОГО ТИРАТРОНА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ КОРОТКОЙ МАГНИТНОЙ ЛИНЗЫ

Для исследования прерывания тока в тиратроне была собрана схема генератора импульсного напряжения с разрядом емкости  $C$  на сопротивление  $R$ , рис.1. При этом тиратрон коаксиально расположен по отношению к двум магнитным линзам 1 и 2. Одна линза формирует постоянное магнитное поле, а другая - импульсное. Прерывание тока исследовалось путем измерения импульса напряжения высокоомным делителем напряжения на  $R$ , с соответствующей регистрацией сигналов на осциллографе.

В экспериментах исследовались режимы прерывания тока в тиратроне в области малых токов и больших, близких к паспортным. Авторами исследовались тиратроны ТГИ1-100/8, ТГИ1-500/16, ТГИ1-1000/25<sup>3</sup>. Регулировка разрядного тока осуществлялась с помощью изменения величины сопротивления  $R$ /см.схему на рис.1/. При этом принципиальное отличие данного исследования прерывания тока в водородном тиратроне состоит в том, что прерывание тока происходит не в минимуме суммарного тока. Для разрыва тока в минимуме суммарного тока необходим дополнительный ис-

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ЦЕНТРАЛЬНЫЙ  
КАБИНЕТ ДОКУМЕНТОВ

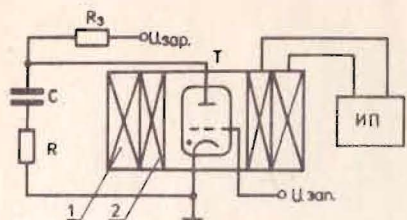


Рис.1. Схема генератора импульсного напряжения для снятия характеристик водородного тиратрона. 1 - короткая магнитная линза постоянного поля; 2 - короткая магнитная линза переменного поля; ИП - источники питания магнитных линз, Т - водородный тиратрон.

точник тока, генерирующий в размыкателе ток, равный по значению и противоположный по знаку прерываемому току.

Магнитное поле короткой линзы состоит из продольной и радиальной компонент. Используя свойства магнитного поля короткой линзы, можно рассматривать процесс прерывания тока в водородном тиратроне как перенос зажигающих центров между смещенными относительно друг друга отверстиями в управляющей сетке из-за искривления траекторий электронов. Действительно, в первые моменты движения электронов /при наличии управляющего импульса на управляющей сетке тиратрона/ на них действует радиальная компонента магнитного поля, которая вызывает вращение электронов по азимуту, т.е. раскручивает электроны по спирали в средней плоскости между двумя электродами управляющей сетки тиратрона. При этом уменьшается вероятность прохождения электронов через отверстие в управляющей сетке в область управляющая сетка - анод. Следующее, фокусирующее, действие магнитной линзы в результате взаимодействия азимутальной скорости электронов и продольной компоненты магнитного поля приводит к тому же эффекту - уменьшению вероятности попадания электронов в область управляющая сетка-анод. В результате этого наблюдается уменьшение суммарного тока, протекающего через тиратрон. Последнее приводит к обрыву тока. В работе<sup>3/</sup> указывается на возможность обрыва тока при незначительном снижении разрядного тока /на несколько процентов/.

Экспериментальные исследования по указанной на рис.1 схеме показали, что рассмотренный выше механизм проявляется в области малых токов  $\leq 1$  А.

В области больших прерывающих токов скорее всего работает другой механизм обрыва тока, который состоит в пинчевании разряда. Этот механизм достаточно хорошо теоретически исследовался в работе<sup>4/</sup>. При этом рассматривался вопрос прерывания дуги на основе ее пинчевания собственным азимутальным магнитным полем большого разрядного тока. Выведенная аналитическая зависимость величины произведения давления Р на диаметр дуги а от энергии электронов имеет вид

$$aP = \text{const} \exp \left[ \frac{\frac{U_i}{U} (1 - BU^{3/2}) T}{1 + U \left( \frac{2}{U_i} + B \right)} \right], \quad (1)$$

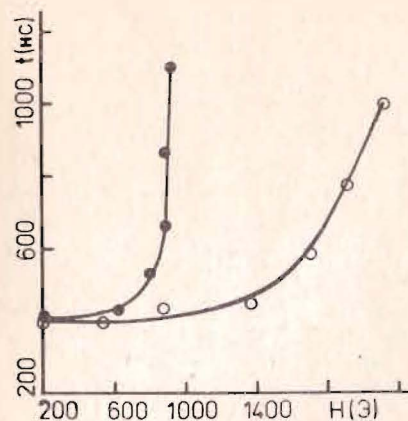


Рис.2. Зависимость времени задержки импульса тока в тиратроне  $t$  от магнитного поля  $H$  при амплитуде запускающих импульсов: ● - 300 В, ○ - 450 В, ▲ - 600 В, ■ - 450 В, ○ - 750 В.

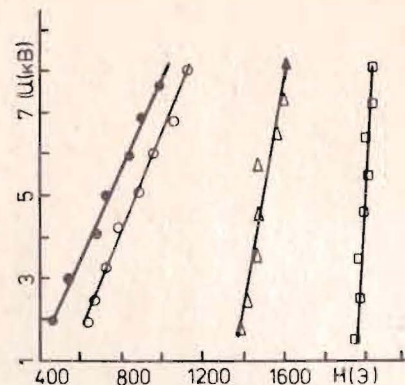


Рис.3. Зависимость влияния магнитного поля  $H$  на коммутирующее напряжение на тиратроне при различных амплитудах запускающих импульсов: ● - 300 В, ○ - 450 В, ▲ - 600 В, ■ - 750 В.

где  $T$  - температура паров газа;  $U_i$  - потенциал ионизации газа;  $B$  - сечение ионизации паров газа;  $U$  - энергия электронов.

Аксиальное магнитное поле, воздействующее на разрядный столб, влияет на коэффициент диффузии /т.е. уменьшает  $aP$  /, при этом происходит увеличение энергии электронов<sup>4.5/</sup>, что соответствует нестабильной ветви горения разряда. При этом магнитное поле производит дополнительное пинчевание шнура дуги, что приводит к большому выносу вещества из области дуги<sup>6/</sup>. Сказанное выше относится к области токов  $100 \div 200$  А.

Экспериментальное исследование прерывания тока в тиратроне показало влияние постоянного магнитного поля на задержку во времени токовых импульсов тиратрона относительно запускающего импульса /рис.2/. На рис.3 приведена зависимость влияния магнитного поля на параметры тиратрона в режиме прерывания тока для тиратрона типа ТГИ1-100/8. Из рисунка видно, что с повышением амплитуды запускающего импульса необходимо увеличивать напряженность магнитного поля. Кроме того, видно повышение крутизны в приведенных зависимостях с увеличением амплитуды запускающих импульсов. Последнее объясняется тем, что зажигающие центры в отверстиях управляющей сетки тиратрона при больших амплитудах запускающего импульса с большей вероятностью формируются независимо от величины магнитного поля. На рис.4 представлены зависимости напряжения на тиратроне от магнитного поля при различных величинах разрядного тока, определяемых RC - цепью.

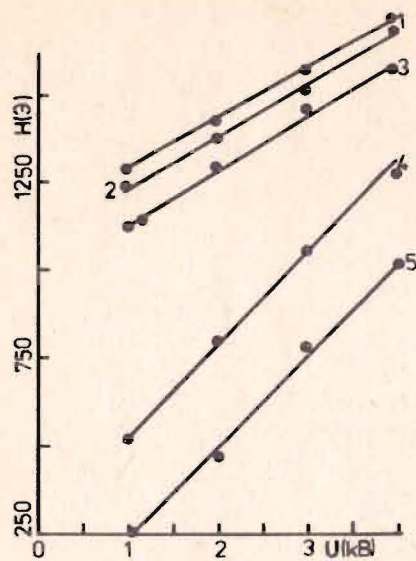


Рис.4. Зависимость коммутирующего напряжения на тиратроне от магнитного поля  $H$  при различных постоянных времени  $RC$ - цепи генератора импульсного напряжения: 5 -  $RC = 7,52$  с, 4 -  $RC = 5,03$  с, 3 -  $RC = 1,2$  с, 2 -  $RC = 2,3 \cdot 10^{-5}$  с, 1 -  $RC = 3 \cdot 10^{-7}$  с.

Использование переменного магнитного поля позволяет реализовать режим получения нескольких импульсов выходного напряжения на сопротивлении  $R$ .

Расположение импульсной короткой линзы, коаксиальное с магнитной линзой постоянного поля, может приводить к некоторой резонансной модуляции тока, протекающего через тиратрон при опреде-

ленных условиях. При этом величины прерывающих токов лежат в области  $100 \div 200$  А /для тиратронов ТГИ1-800/8, ТГИ1-500/16/.

Исследование тиратрона с заземленной сеткой в режиме прерывания тока показало более высокую стабильность его работы по сравнению с заземленным катодом в режиме больших прерывающих токов. В этом случае облегчаются условия для пинчевания разрядного тока тиратрона.

Наименьшие времена прерывания тока в тиратронах приведены в таблице.

Таблица 1

	Время прерывания /нс/			
	С заземленным катодом		С заземленной сеткой	
	Малые токи	Паспортные максимальные токи	Малые токи	Паспортные максимальные токи
ТГИ1-100/8	120+20	180+50	100+10	120+15
ТГИ1-500/16	150+30	200+40	120+20	130+20
ТГИ1-1000/25	200+30	250+45	140+25	155+29

## 2. ГЕНЕРАТОР ИМПУЛЬСНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

На рис.5 приведена схема генератора импульсного напряжения с совмещенными емкостным и индуктивным накопителями энергии. Принцип его работы заключается в следующем. При подаче управляющего сигнала на управляющую сетку тиратрона Т1, последний открывается и проводит ток в цепи  $C - L_1 L_2$ . При этом последовательное включение катушек индуктивностей  $L_1$  и  $L_2$  представляет собой индуктивный делитель напряжения, необходимый в начальный период времени /после открытия тиратрона Т1/ для открытия тиратрона Т2. Управляющая сетка тиратрона Т2 находится под постоянным импульсным /синхронизованным запуском Т1/ напряжением. При этом роль индуктивного накопителя выполняет индуктивность  $L_1$ . Нагрузкой может быть как индуктивность  $L_2$  /она выполняет еще одну роль - создание индуктивного делителя напряжения/, так и активная  $R_{II}$ .

За время  $t_0$  тиратрон закрывается, энергия, запасенная в  $L_1$ , передается в нагрузку  $L_2$  и  $R_{II}$ . Работа такого генератора с индуктивной нагрузкой может открыть возможность его использования в схемах и устройствах соленоидов с высоким временем нарастания тока в соленоиде, магнитное поле которого можно использовать для жатки плазмы.

Величина выходного напряжения будет определяться по формуле

$$U_{\text{вых}} = - L_1 \frac{di}{dt}, \quad /2/$$

где  $\frac{di}{dt}$  - скорость выключения тиратрона.

Принимая линейный характер выключения тока в тиратроне,

$$J = J_{\text{max}} \left[ 1 - \frac{t}{t_0} \right], \quad /3/$$

где  $t_0$  - время выключения тока с тиратрона;

$J_{\text{max}}$  - максимальный ток в разрядной цепи.

Учитывая особенности схемы, и, в частности, наличие индуктивного делителя напряжения, в котором  $L_2$  шунтируется тиратроном Т2, т.е. возрастание тока в разрядной цепи и укорачивание длительности разряда емкости на индуктивность, значение  $L_2$  для

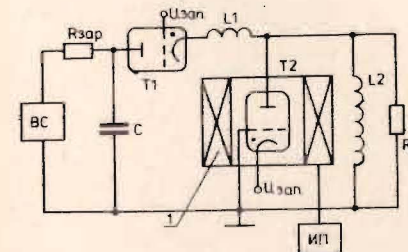


Рис.5. Схема генератора импульсного напряжения с совмещенным емкостным и индуктивным накопителем энергии.

ИП - источник питания магнитной линзы; Т1, Т2 - водородные тиратроны типа ТГИ1-500/16.

конечных расчетов отбросим. Поэтому значение  $J_{\max}$  определим как

$$J_{\max} = \frac{U_3 \sqrt{C}}{\sqrt{L_1}} \quad /4/$$

Подставляя /3/ и /4/ в /2/, получаем

$$U_{\text{вых}} = - \frac{U_3 \sqrt{L_1 C} \left(1 - \frac{t}{t_0}\right)}{dt} \quad /5/$$

Так,  $R_H$  в начальный момент времени и во время выключения тиратрона равно  $R_H = \infty$ , т.к. пушка не имеет эмиссии электронов, то значение  $R_H$  не будем учитывать при вычислении  $U_{\text{вых}}$ . Когда наступает эмиссия, т.е. идет электронный ток, импульс выходного напряжения укорачивается по длительности.

Оценим коэффициент полезного действия схемы без учета активных потерь в  $L_1$ .

Мощность, отдаваемая индуктивностью  $L_1$ ,

$$P = \frac{J_{\max}^2 L_1 \cdot f}{2} \quad /6/$$

где  $f$  - частота следования импульсов.

Мощность потерь проводимости тиратрона T2

$$P_{\text{п.т.}} = \frac{J_{\max} \cdot \Delta U \cdot t_{\text{пр}} \cdot f}{2} \quad /7/$$

$\Delta U$  - падение напряжения на тиратроне T2,  $t_{\text{пр}}$  - время проводимости тиратрона.

Потребляемая мощность

$$P_{\text{потр}} = \frac{L_1 J_{\max}^2 f}{2} + \frac{J_{\max} \Delta U t_{\text{пр}} \cdot f}{2} \quad /8/$$

Мощность потерь на аноде тиратрона за время его выключения:

$$P_{\text{п.а.}} = \frac{1}{T} \int_0^{t_0} i_T U_{\text{вых}} T_2 dt, \quad /9/$$

$U_{\text{вых}} T_2$  - напряжение на T2 в момент его выключения.

Подставив в /9/ значение  $i_T = J_{\max}$  и  $U_{\text{вых}}$  и проинтегрировав выражение /9/, получим

$$P_{\text{п.}} = f \cdot J_{\max} U_{\text{вых}} T_2 t_0 \quad /10/$$

Мощность, отдаваемая в нагрузку,

$$P_H = \frac{L_1 J_{\max}^2 f}{2} - f J_{\max} U_{\text{вых}} T_2 t_0 \quad /11/$$

Отсюда получаем к.п.д.  $\eta$ :

$$\eta = \frac{P_H}{P_{\text{потр}}} = \frac{L_1 J_{\max}^2 - 2U_{\text{вых}} T_2 t_0}{L_1 J_{\max}^2 + \Delta U t_{\text{пр}}} \quad /12/$$

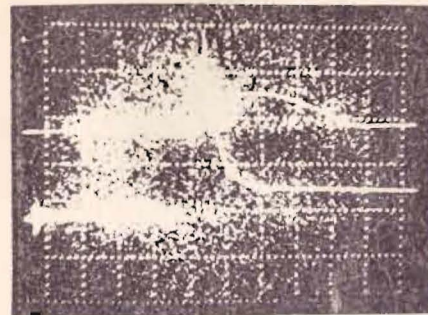


Рис.6. Типичные оциллограммы импульса напряжения на выходе генератора /нижний импульс/ и импульса тока в магнитной линзе /верхний импульс/; время развертки луча осциллографа 1(мкс/см).

Из /12/ видно, что к.п.д. схемы возрастает при уменьшении времени выключения и напряжения на тиратроне T2 в момент его выключения. Проведенные экспериментальные исследования показали довольно высокий к.п.д. При разработке генератора использовались тиратроны ТГИ1-500/16 и ТГИ1-1000/25.

Проведенные эксперименты показали, что на  $L_1$  формируется импульс напряжения, форма которого приведена на оциллограмме /см.рис.6/. При этом возможно прерывание как на переднем фронте импульса тока разряда С на  $L_1 + L_2$ , так и на заднем.

При напряжении  $U_3 = 1$  кВ на нагрузке получено выходное напряжение  $\sim 24$  кВ. При этом к.п.д. генератора составляет  $\sim 60\%$ . Время прерывания тока достигает  $130 \pm 1000$  нс.

Рассмотренная схема позволяет при относительно низком зарядном напряжении получать выходное напряжение /десятки киловольт/, достаточное для питания электронной пушки, формирующей низкоэнергетичные электроны. Кроме того, модуляция магнитного поля на фоне постоянного магнитного поля позволит реализовать режим пакета импульсов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований было экспериментально доказано прерывание тока в водородном тиратроне, помещенном в магнитном поле, на основе чего был разработан генератор импульсного напряжения с совмещенным емкостным и индуктивным накопителями энергии для питания электронной пушки, формирующей низкоэнергетичные электроны.

Работа схемы генератора на индуктивную нагрузку, которой может быть соленоид, позволяет его использовать в установках для получения больших скоростей нарастания тока в соленоидах, магнитное поле которых используется для сжатия плазмы, в лазерной технике.

Работа водородного тиратрона в режиме прерывания тока в частотном режиме, определяемом его паспортными параметрами и условиями заряда накопительного конденсатора, повышает эффек-

тивность генератора с совмещенным емкостным и индуктивным накопителями энергии.

#### ЛИТЕРАТУРА.

1. Месяц Г.А. Генерирование мощных наносекундных импульсов. "Советское Радио", М., 1974.
2. Коваль Б.А. и др. В кн.: Сильноточные импульсные электронные пучки в технологии. Под ред. Г.А.Месяца, "Наука" Новосибирск, 1983, с.26.
3. Фогельсон Т.Б., Бреусов Л.Н., Вагин Л.Н. Импульсные водородные тиратроны. "Советское Радио", М., 1974.
4. Полетаев И.А. ЖТФ, 1951, XXI, 9, с.1021.
5. Fraser D.A., Gour J. Brit. J. Appl.Phys., 1961, vol.16, p.1211.
6. Голант Б.Е., Жилинский А.П., Сахаров И.Е. Основы физики плазмы. Атомиздат, М., 1977.

Рукопись поступила в издательский отдел  
26 апреля 1985 года

Коренев С.А., Енчевич И.Б., Михов М.К.  
Генератор импульсного напряжения  
для питания электронной пушки

13-85-306

Приведены результаты экспериментального исследования прерывания тока, протекающего через водородный тиратрон, помещенный в продольное магнитное поле короткой магнитной линзы. На основе этого явления разработан генератор импульсного напряжения с совмещенным емкостным и индуктивным накопителями энергии для питания электронной пушки.

Работа выполнена в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1985

Перевод О.С.Виноградовой

Korenev S.A., Enchevich I.B., Mihov M.R.  
The Pulse Voltage Generator for the  
Electron Cannon Supply

13-85-306

The paper represent some results of experiment current interruption research. The current passes threw the hydrogen thyratron put in the longitudinal magnetic field of the short lens. A pulse tention generator is elaborated on the base of this phenomenon. Its condensator and induction energy accumulators for the electron cannon supply are combined.

The investigation has been performed at the Department of New Acceleration Methods, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1985