

На дом не выдается

2/34

# ЭЛЕКТРОННЫЕ УСКОРИТЕЛИ

ТРУДЫ  
V Межвузовской конференции,  
Томск, 17—21 марта 1964 г.



АТОМИЗДАТ  
Москва 1966



1966  
11096

В сборнике помещены доклады, представленные на V Межвузовскую конференцию по электронным ускорителям, которая состоялась в г. Томске 17—21 марта 1964 г.

Доклады представляют интерес для специалистов, работающих в области разработки и изготовления электронных ускорителей, а также для инженеров и научных работников, работающих с ускорителями.

# I. ЛИНЕЙНЫЕ И ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ УСКОРИТЕЛИ

ЗАМ СССР  
Институт Науки - ТОХИ.  
Библиотека

СВЕРЕНО  
21000

43124-66

СВЕРЕНО  
1983 г.

С  
19...



## ГЕНЕРАТОР НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ ДЛЯ ИНФЛЕКТОРА СИНХРОТРОНА

М. Ю. ГЕЛЬЦЕЛЬ, В. С. ПАНАСЮК, А. Д. ПАНФИЛОВ,  
С. С. СОБОЛЕВ, Л. И. ЮДИН

Институт ядерной физики СО АН СССР

Для управления движением заряженных частиц нередко требуются мощные высоковольтные генераторы наносекундных импульсов напряжения или тока с мощностью в импульсе несколько мегаватт. Синхронизация генераторов, т. е. связь мощного импульса с запуском во времени, при этом должна быть не хуже единиц наносекунд. Как правило, в качестве коммутаторов в генераторах используются разрядники [1—3]. Разрядники обладают рядом принципиальных недостатков при работе с большой частотой повторения и особенно в случае необходимости оперативного изменения величины напряжения импульсов в широких пределах. Существенным недостатком мощных разрядников наносекундного диапазона является их недолговечность [3, 5]. В связи с этим была рассмотрена возможность использования в указанных целях мощных водородных тиратронов.

Результаты исследования тиратронов приведены в [6]. Как показали измерения, стабилизация источника напряжения питающего генератор до 0,1%, тепловая изоляция, обеспечиваемая кожухом, в который заключен тиратрон, а также большое поджигающее напряжение позволяют получить для всех тиратронов кратковременную нестабильность задержки, определяемую долями наносекунды. Максимальная нестабильность тиратронов, предварительно прогретых в течение 1—1,5 ч, не превышает  $\pm 1$  нсек за 7 ч работы для типов ТГИ-1-325/16, ТГИ-1-400/16, ТГИ-1-700/25. Исключение составляет тиратрон ТГИ-1-2500/35, у которого эта нестабильность достигает  $\pm 5$  нсек. Для практических целей более важное значение представляет среднеквадратичная нестабильность, превышающая 1 нсек только для ТГИ-1-2500/35. Измерения проводились в нормальных лабораторных условиях при частоте 1—50 гц. Импульсы были синхронизованы с частотой сети с точностью около 1%.

Таким образом, тиратроны при соответствующих условиях позволяют решить вопрос синхронизации генераторов. Недостатком тиратронов является относительно большая длительность фронта импульса — от 12—20 нсек для ТГИ-1-325/16 и до 30—40 нсек для ТГИ-1-2500/35, зависящая от времени развития разряда в тиратроне. В связи с этим для формирования импульса длительностью 10—50 нсек с фронтами 1—5 нсек используется нелинейная ферритовая линия [7], нагруженная на специальное формирующее Т-образное звено. Рассмотрим коротко работу ферритовой линии с ударной волной.

**Ферритовая линия с ударной волной.** И. Г. Катаевым [7] проведен ряд работ по теоретическому исследованию и практическому применению систем, формирующих ударную волну с фронтом порядка десятых долей наносекунды. Показано, что при работе с токами более 50—100 а предпочтительно использовать формирующее устройство в виде коаксиальной линии, содержащей в качестве нелинейного элемента феррит с прямоугольной петлей намагничивания. Там же даны элементы расчета и рекомендации по конструированию такого рода устройств. Использованные нами ферритовые линии были выполнены на основе работ И. Г. Катаева.

При использовании в качестве плеч Т-звена отрезков ВЧ-кабеля с волновым сопротивлением  $\rho = 75$  ом входное сопротивление Т-звена получается равным 37,5 ом. Для максимальной передачи мощности в нагрузку волновое сопротивление ферритовой линии на ударном фронте  $\rho_y$  должно быть также равно 37,5 ом. С учетом этого и была сконструирована ферритовая линия.

Начальное состояние феррита, величина входного и выходного сопротивлений нелинейной линии могут в некоторых пределах регулироваться током подмагничивания. Для случая полной намагниченности феррита постоянным начальным магнитным полем против поля волны магнитная проницаемость на фронте ударной волны  $\mu_y = 4 \div 5$ . При этом входное сопротивление линии, определяемое формулой

$$\rho_{вх} = \frac{\rho_y}{\sqrt{\mu_y}},$$

получается равным 18 ом.

Необходимая длина ферритовой линии определяется длительностью фронта простой волны на входе линии и ее амплитудой [7]. В соответствии с расчетом для амплитуды простой волны, равной 16 кВ, и длительности фронта  $\tau_{вх} = 30$  нсек, что соответствует работе тиратрона ТГИ-1-2500/35, ферритовая линия должна иметь длину 4 м. Линия была выполнена на основе феррита марки ВТ-5, внешний и внутренний диаметры ферритового тороида составляли 3 и 2 мм. Для повышения электрической прочности она помещалась в трансформаторное масло. Конструкция линии приведена на рис. 1.



Следует отметить некоторые особенности работы ферритовой линии при формировании крутых перепадов напряжения и тока. С изменением входного напряжения меняется ударная магнитная проницаемость  $\mu_y$ , а значит, и время прохождения ударного фронта по линии. Расчетная и экспериментальная кривые зависимости времени прохождения сигнала по линии от напряжения простой падающей волны приведены на рис. 2. Как следует из графика, имеет место довольно резкая зависимость задержки от величины входного напряжения. Стабильность ее в

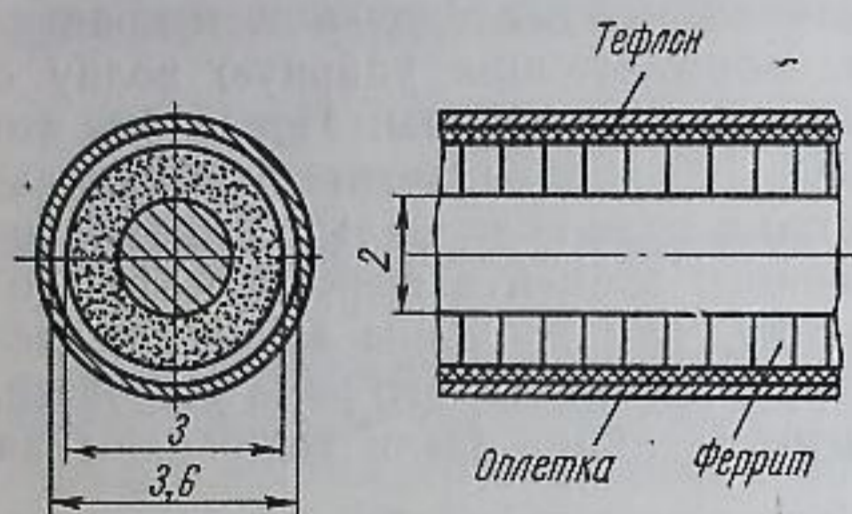


Рис. 1.

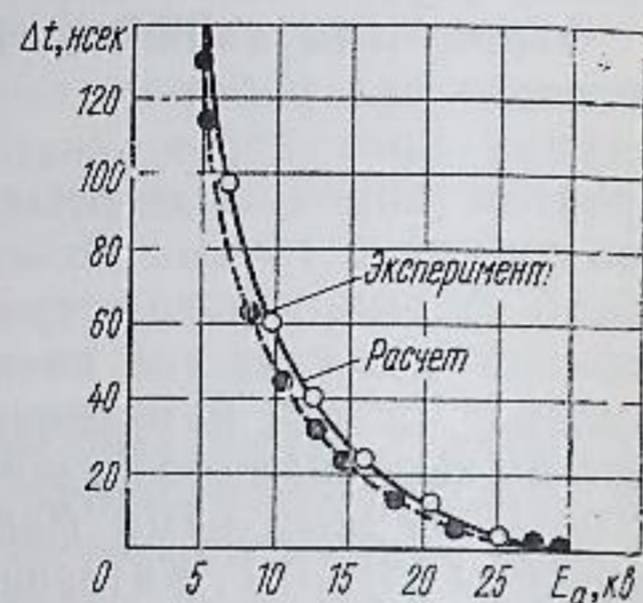


Рис. 2.

широком диапазоне остается в пределах 1 нсек, если напряжение стабилизировано в каждой выбранной точке с точностью  $\sim 0,5 \div 1\%$ . При средней мощности системы порядка 1 квт (частота повторения 50 гц) это не составляет больших трудностей.

Величина  $\mu_y$ , а следовательно, и время прохождения сигнала по линии зависят от начального подмагничивания. Чтобы оценить влияние стабильности тока подмагничивания на стабильность времени прохождения сигнала через ферритовую линию, проведены расчеты и измерения для амплитуды падающей волны 16 кв, результаты которых приведены на рис. 3. Как видно из графика, при начальном подмагничивании  $H_H$  порядка 0,2 а/см и более, что соответствует току подмагничивания  $I_H \sim 100$  ма, стабильность задержки от величины подмагничивания практически не зависит.

**Звено формирования импульса.** Формирующим устройством в схеме генератора импульсов (см. рис. 4) является Т-звено ( $l, Tr_3$ ), одно из плеч которого замкнуто накоротко, а другое нагружено на емкость отклоняющих пластин впуска  $C_H$ . Как отметил Ю. А. Мостовой, если в такой схеме короткозамкнутое плечо имеет ту же длину, что и разомкнутое, то в системе имеет место всего одно отражение, уходящее в тракт генератора через время, равное двум длительностям импульса после поступления скачка напряжения на вход Т-звена. Это отражение можно погасить на внутреннем сопротивлении генератора,

тогда в системе будут отсутствовать отраженные сигналы, что очень важно для повышения эффективности захвата инжектированных частиц. Нетрудно показать, что при подключении к (отклоняющие пластины инфлектора) срез импульса затягивается больше, чем фронт. Однако эта разница мала и не влияет на работу ускорителя.

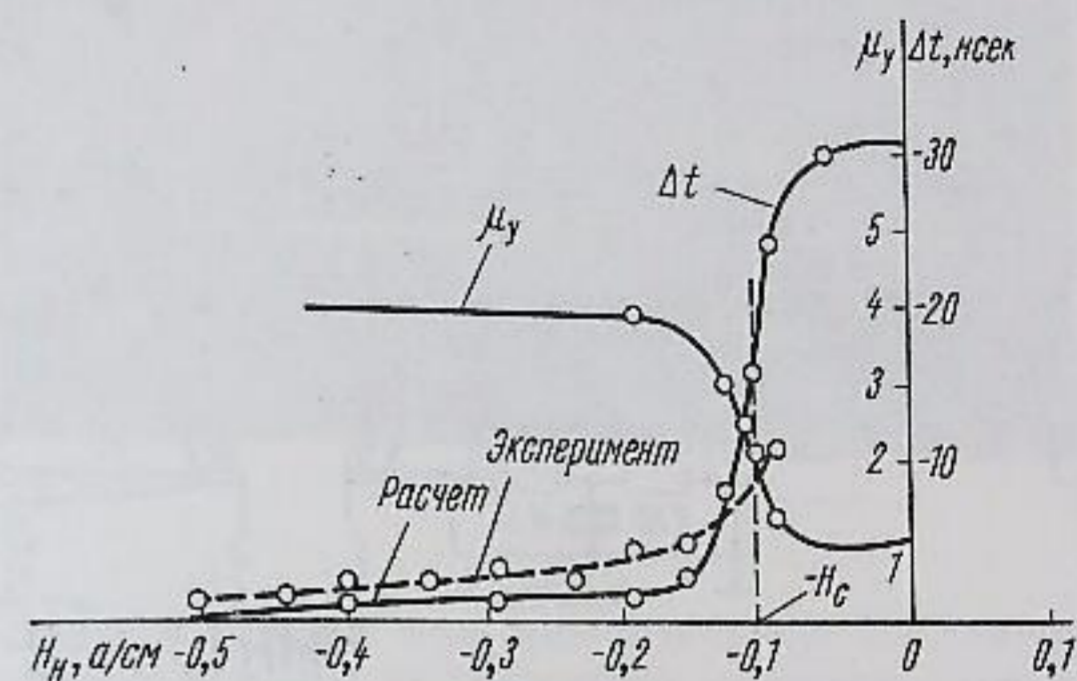


Рис. 3.

Длительность плоской части импульса на емкости  $C_H$  определяется удвоенным временем прохождения волны по плечу Т-звена:

$$\tau_H = 2 \frac{l}{v},$$

где  $l$  — длина плеча;  $v$  — скорость распространения волны.

Сам процесс формирования импульса, т. е. взаимодействие падающих и отраженных волн напряжения и тока внутри звена, определяется граничными условиями на концах плеч и специальных объяснений не требует.

Рассмотрим некоторые параметры фронта и среза импульса и возможные отражения вследствие асимметрии Т-звена с учетом емкости нагрузки  $C_H$ .

Длительность фронта на уровне 0,1—0,9 определяется, как обычно, выражением

$$\tau_\phi = 2,2\rho C_H,$$

где  $\rho$  — волновое сопротивление плеча Т-звена, подключенного к нагрузке;  $C_H$  — емкость нагрузки.

Напряжение на срезе импульса изменяется по закону

$$\frac{E_{\text{вых}}(t)}{E_{\text{вых, макс}}} = \left(1 + \frac{t}{\rho C_H}\right) e^{-\frac{t}{\rho C_H}}.$$



Длительность среза на уровне 0,1—0,9 составляет  $\sim 3,9\rho C_H$ . При  $\rho = 150 \text{ ом}$  и  $C_H = 10 \text{ пф}$   $\tau_{\phi} = 3,5 \text{ нсек}$  и  $\tau_{\text{ср}} = 6 \text{ нсек}$ .

Кроме того, через время  $t = 5 \frac{l}{v}$  с момента появления напряжения на входе Т-звена (на нагрузке  $C_H$ ) возникает повторный импульс обратного знака. Повторный импульс имеет длительность на полувысоте  $\sim 4\rho C_H$ , максимальное значение его амплитуды достигает 26% амплитуды основного импульса через

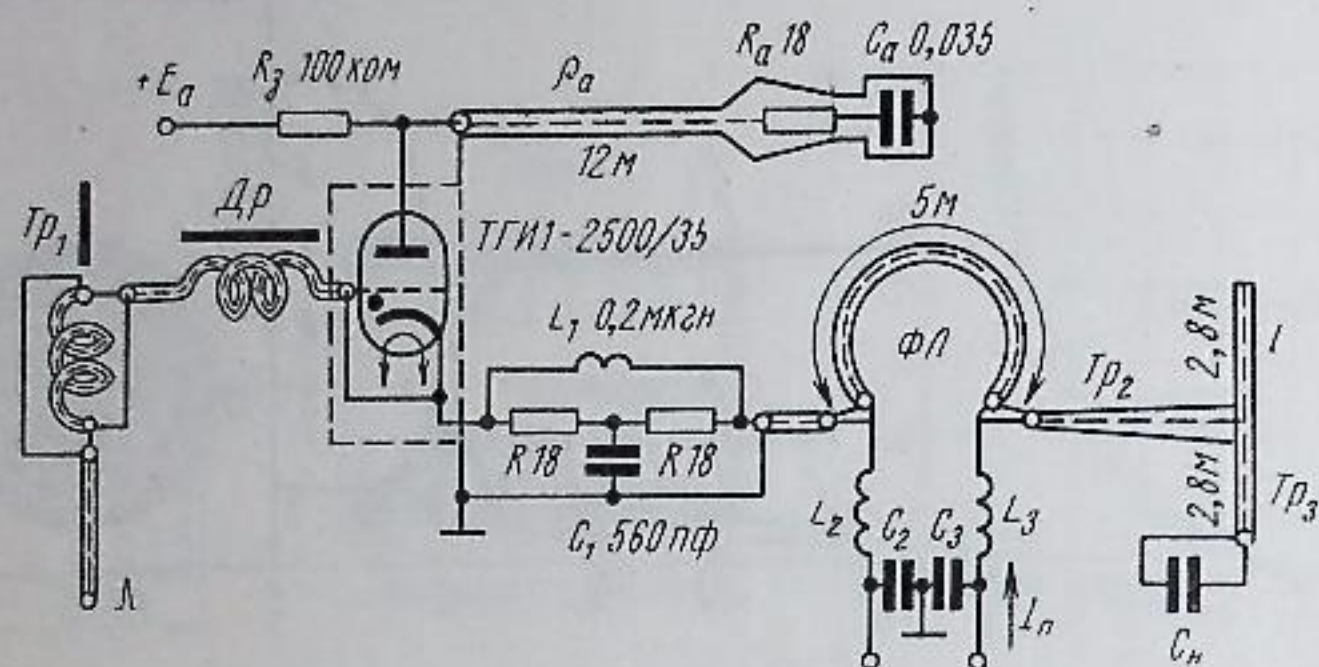


Рис. 4.

время  $t = 2\rho C_H$  после начала повторного импульса. Этот импульс достаточно хорошо компенсируется увеличением длины закороченного плеча на величину

$$\Delta l = \frac{\rho C_H}{v}$$

**Схема генератора.** Схема генератора приведена на рис. 4. Формирующая линия в аноде тиратрона заряжается до напряжения  $E_a$ . При пробое тиратрона в катодную линию поступает импульс с крутым передним фронтом, плоской вершиной, величина которой зависит от длины анодной формирующей линии и пологим срезом, определяемым постоянной времени разряда емкости  $C_a$  через сопротивление  $R_a$ .

Как указано в [7], для получения минимальной длины ферритовой линии ее волновое сопротивление  $\rho_{\text{вх}}$  при замагниченных ферритах и выходное сопротивление источника исходных сигналов должны быть одинаковы. Параллельное включение четырех кабелей РК-103 в анодной цепи обеспечивает  $\rho_a = 18 \text{ ом}$ .

Согласующее сопротивление  $R_a$  по величине равно волновому сопротивлению анодной линии  $\rho_a$ . Вместе с блокирующими конденсаторами  $C_a$  (КОБ-3) оно помещено в конденсаторное масло, что позволяет хорошо согласовать сопротивление без потери электрической прочности.

Скачок напряжения с амплитудой  $E_a/2$ , сформированный тиратроном (рис. 5), поступает на вход ферритовой линии. Начальное состояние феррита определяется током подмагничивания от специального источника. Входное сопротивление ферритовой ли-

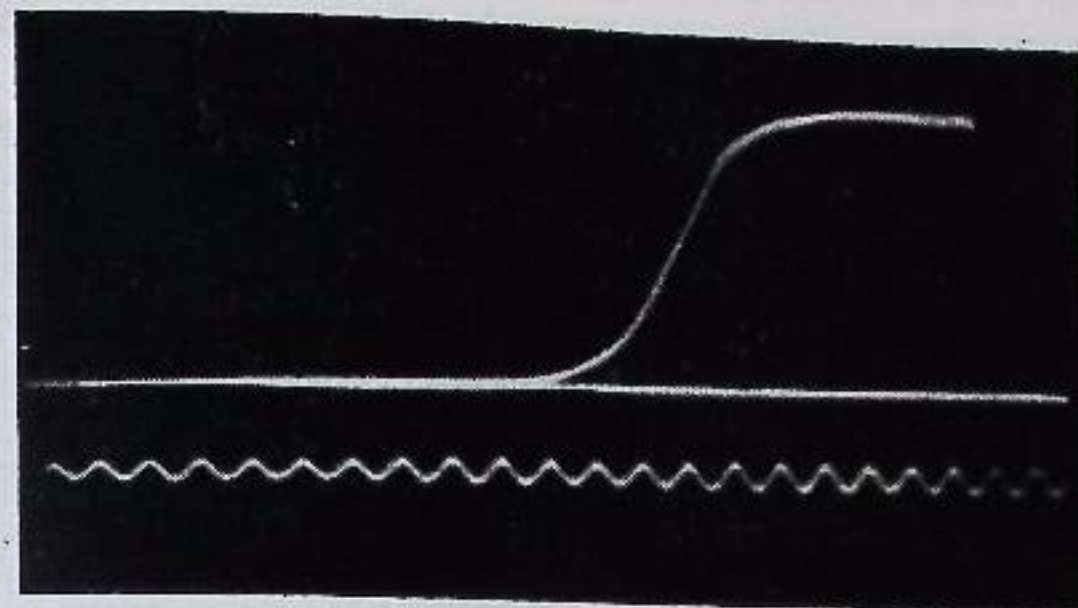


Рис. 5.

нии на ударном фронте при максимальном  $E_a$  равно входному сопротивлению Т-звена, являющегося нагрузкой для ферритовой линии, т. е. 37,5 ом. Импульс на выходе ферритовой линии показан на рис. 6. (Осциллограммы рис. 5 и 6 сняты на осциллографе типа ОК-19М, калибровка: 1 период — 10 нсек.)

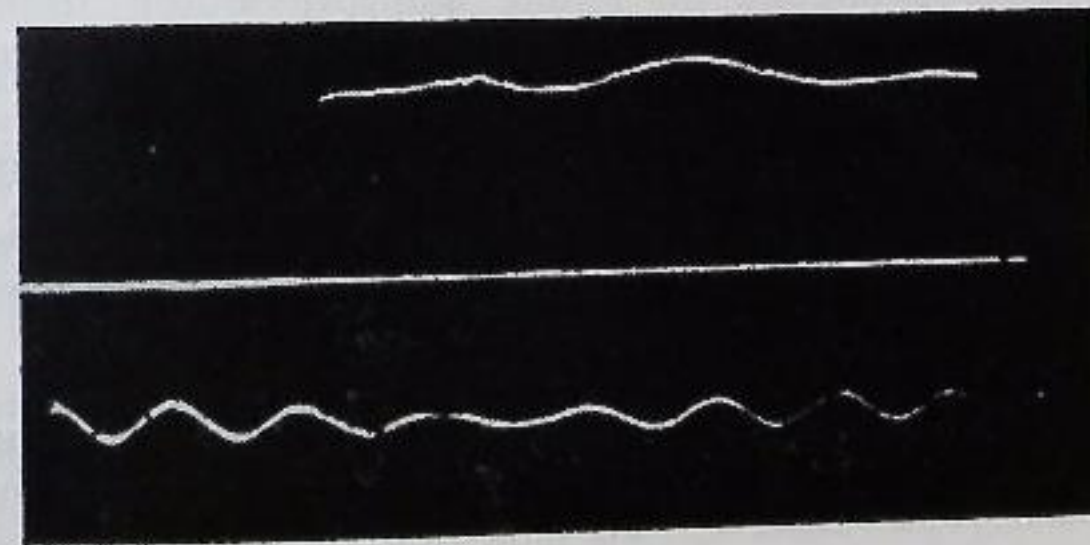


Рис. 6.

На разомкнутом конце Т-звена, подключенном к отклоняющим пластинам, формируется импульс с удвоенной амплитудой. Длительность его определяется длиной плеч Т-звена и в нашем случае составляет 28 нсек.

В целях повышения напряжения на выходе разомкнутое плечо схемы формирования выполнено в виде трансформатора (Тр3). Входное сопротивление плеча 75 ом, выходное 150 ом. Коэффициент трансформации по напряжению  $\sqrt{2}$ . Практически это осуществлено путем уменьшения диаметра внутренней жилы кабеля РК-8 с 2,4 до 0,4 мм при длине отрезка 2,8 м. Для



сохранения электрической прочности пространство между центральным проводом и полиэтиленовой изоляцией заполнено конденсаторным маслом. Таким образом, на выходе можно получить напряжение  $U_{\text{вых}}$ , равное  $\frac{E_a}{2} 2 \cdot \sqrt{2}$ . При  $E_a = 35$  кв  $U_{\text{вых}} \approx 50$  кв. Спад вершины, имеющий место при прохождении импульса через такой трансформатор, определяется [8] выражением

$$\frac{t_3}{\tau} = \frac{50 (\ln N)^2}{\rho},$$

где  $t_3$  — время прохождения сигнала по трансформирующему кабелю,  $\tau$  — длительность импульса,  $N$  — коэффициент трансформации по напряжению,  $\rho$  — спад вершины, %.

В рассматриваемом случае спад составляет 10%, что не выходит за пределы допустимой неоднородности вершины.

**Отражения.** Как уже отмечалось, для повышения эффективности захвата следует стремиться к снижению количества и амплитуды отражений на пластинах инфлектора. Рассмотрим с этой точки зрения участки в тракте генератора, от которых может появиться отражение. Таких участков два.

Первая неоднородность — выход ферритовой линии. К моменту прихода отраженного импульса ферритовая линия полностью намагничена и имеет выходное сопротивление  $\rho_{\text{вых}} = 18$  ом, тогда как сопротивление на входе формирующей цепи равно 37,5 ом. В месте стыка возникает отражение с коэффициентом  $\rho = -0,37$ .

Вторая неоднородность — тиратрон, представляющий собой индуктивность, включенную в тракт передачи импульса. Постоянная времени цепи  $\frac{L_{\tau}}{2\rho_{\text{вых}}} = 13,5$  нсек [6]. Очевидно, и здесь имеет место значительное отражение.

Для борьбы с отражением от выхода ферритовой линии используется кабельный трансформатор  $Tr_2$ , сходный с примененным в разомкнутом плече схемы формирования. Входное сопротивление трансформатора  $Tr_2$  со стороны ферритовой линии равно 18 ом, выходное, подключенное к цепи формирования, — 37,5 ом.

В режиме, когда требуется иметь на выходе максимальное напряжение, через трансформатор передается 90% мощности падающей волны. Это соответствует потере напряжения на выходе около 5%. При этом отраженная волна уже не встречает неоднородности на выходе ферритовой линии.

Практически трансформатор выполнен из двух последовательно включенных отрезков кабеля РКГ-15, диэлектрик в которых сточен по длине до необходимых расчетных величин. Длина трансформатора определяется из допустимого спада вершины импульса [8].

Отражение от тиратрона можно уменьшить за счет сужения спектра частот обратной волны, поступающей на тиратрон. Это достигается посредством амплитудного выравнивателя [9], включенного между катодом тиратрона и входом ферритовой линии. В таком выравнивателе потери растут с частотой, тогда как входное и выходное сопротивления остаются постоянными.

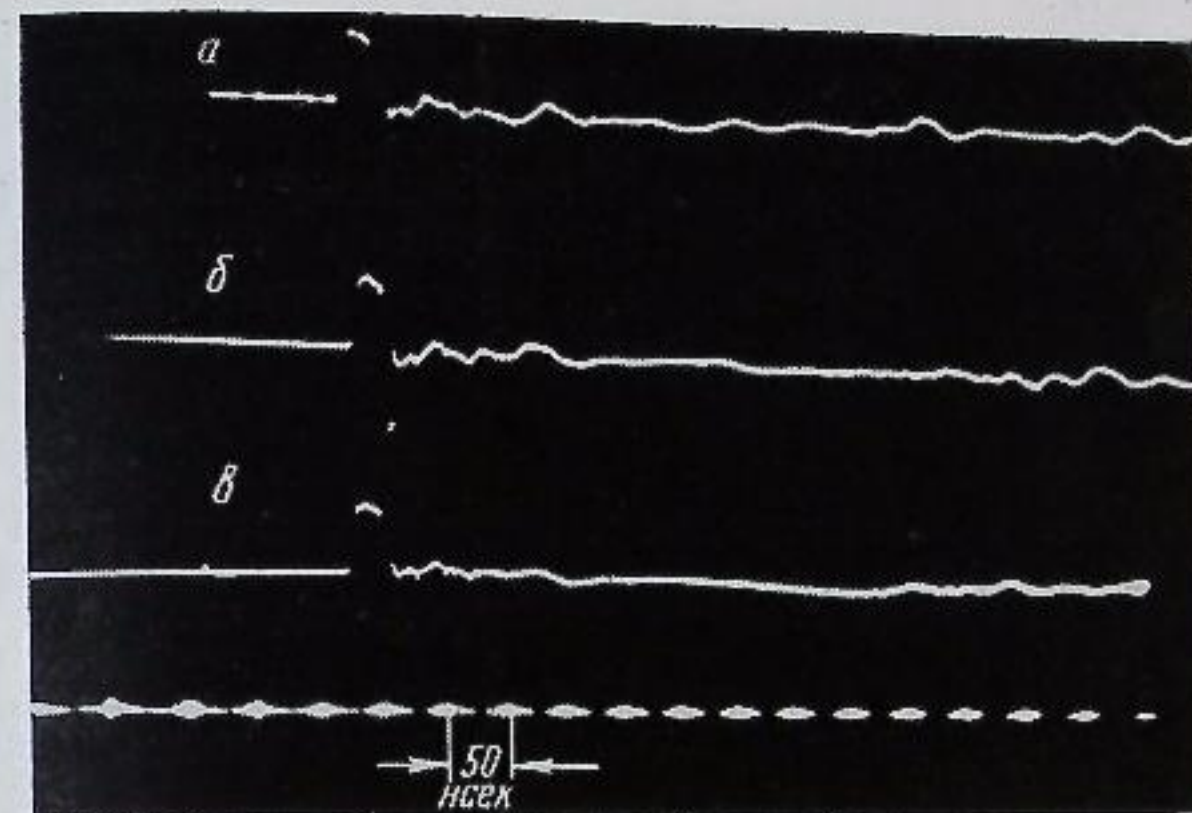


Рис. 7.

Фронт импульса, проходящего в катод тиратрона после выравнивателя, составляет 20—23 нсек вместо 1,5—2 нсек до выравнивателя. Амплитуда отражения от тиратрона при этом не превышает 10% амплитуды основного напряжения на инфлекторе. Амплитуда прямого импульса падает не более чем на 3÷5%.

На рис. 7 показан импульс и последующие отражения на инфлекторе для случая без коррекции отражений (а), с коррекцией отражений от выхода ферритовой линии (б) и с полной коррекцией (в).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Генератор, выполненный в соответствии с описанной схемой, обеспечивает формирование импульса на пластинах инфлектора с амплитудой до 50 кв при длительности около 30 нсек при фронтах порядка 5 нсек.

Максимальная нестабильность времени между подачей поджигающего импульса на тиратрон и появлением напряжения на отклоняющих пластинах лежит в пределах  $\pm 5$  нсек в диапазоне напряжений  $E_a = 10 \div 35$  кв. Среднеквадратичное значение нестабильности составляет около 1,5 нсек. Для уменьшения максимальной нестабильности до  $\pm 1$  нсек можно использовать



тиратрон ТГИ-1-750/25. Несколько увеличив коэффициент трансформации сигнала по тракту или включив сигнал противоположной полярности на обе пластины, легко сохранить и даже повысить действующее напряжение на инфлекторе.

Следует отметить, что режим работы тиратрона позволяет в случае необходимости повысить напряжение без снижения стабильности.

Генераторы, выполненные по описанной схеме, эксплуатируются в ИЯФ СО АН СССР около года и отличаются высокой надежностью и простотой в эксплуатации.

В заключение авторы пользуются возможностью поблагодарить за постановку работы и постоянное внимание к ней А. А. Наумова, а также выражают благодарность И. Г. Катаеву за содержательные консультации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. О'Нейл Дж. В сб. «Накопление релятивистских частиц». М., Госатомиздат, 1963, стр. 17.
2. Гришаев И. А. и др. «Приборы и техника эксперимента», № 4, 139 (1963), стр. 139.
3. Бондаренко Л. М. Диссертация, Новосибирск, 1964.
4. Месяц Г. А., Коршунов Т. С. «Приборы и техника эксперимента», № 4, 115 (1963).
5. Смирнов С. А. и др. «Приборы и техника эксперимента», № 3, 89 (1961).
6. Гельцель М. Ю. и др. «Некоторые характеристики водородных тиратронов в наносекундном диапазоне». Доклад на конференции по ядерной электронике. М., февраль 1964.
7. Катаев И. Г. Ударные электромагнитные волны. М., Изд-во «Сов. радио», 1963.
8. Льюис И. и Уэлс Ф. Миллимикросекундная импульсная техника. М., Изд-во иностр. лит., 1956.
9. Ленди Р., Дэвис Д., Албрехт А. А. Справочник радиоинженера. М., Госэнергоиздат, 1961.

## ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ ГЕНЕРАТОР С ИМПУЛЬСНОЙ МОЩНОСТЬЮ 8 Мвт ДЛЯ СИЛЬНОТОЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО УСКОРИТЕЛЯ

Ю. А. ГРИЦ, Г. Н. ОСТРЕЙКО, В. С. ПАНАСЮК, Л. И. ЮДИН

Институт ядерной физики СО АН СССР,  
Физико-технический институт ГКИАЭ СССР

В 1960—1962 гг. в Физико-техническом институте был разработан и сооружен импульсный линейный ускоритель (ИЛУ), дающий пучок электронов со следующими параметрами: ток до 40 а; энергия 1,3 Мэв; разброс энергии электронов в пучке  $\pm 0,5\%$ ; длительность импульса тока 7 нсек. Этот ускоритель, настроенный и пущенный в эксплуатацию в Институте ядерной физики СО АН СССР, используется в настоящее время для однооборотной инжекции в электронный синхротрон [1].

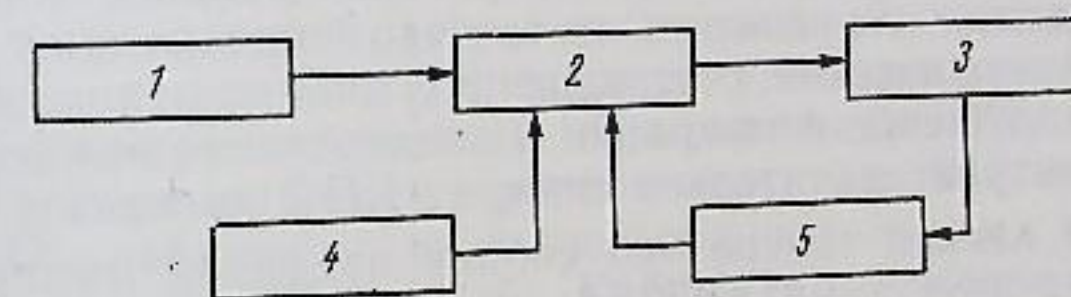


Рис. 1.

Для ускорения частиц используется высокочастотная энергия, накопленная в резонаторе с резонансной частотой 6,4 Мгц. Время, необходимое для накопления энергии в резонаторе, определяется процессом установления колебаний в нем. Переходным процессам в схеме посвящена отдельная работа [2].

Блок-схема высокочастотной системы ускорителя приведена на рис. 1. Для генератора 2 выбрана обратная связь через высокооборотную нагрузку 3. Подбор фазы обратной связи осуществляется посредством раздвижной коаксиальной линии 5. Схемы такого типа весьма распространены в ускорительных устройствах и применяются в тех случаях, когда по условиям работы частота напряжения на резонаторе не связана жестко с работой других систем и может изменяться вместе с уходами