

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



9306

ЭКЗ. ЧИТ. ЗАЛА

P13 - 9306

Я.В.Гришкевич, Г.Петер, Д.Позе, Х.Рюгер,
К.Трючлер, А.Швинд

СИСТЕМА ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ПИТАНИЯ
СТРИМЕРНОЙ КАМЕРЫ
НА БАЗЕ ИМПУЛЬСНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

1975

P13 - 9306

Я.В.Гришкевич, Г.Петер,* Д.Позе, Х.Рюгер,
К.Трючлер, А.Швинд*

СИСТЕМА ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ПИТАНИЯ
СТРИМЕРНОЙ КАМЕРЫ
НА БАЗЕ ИМПУЛЬСНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Направлено в ПТЭ

* Институт физики высоких энергий, АН ГДР .
(Цойтен).

Как известно, одним из условий реализации стримерного режима является формирование коротких импульсов /10-20 нс/, обеспечивающих напряженность электрического поля 15-25 кВ/см в рабочем зазоре камеры. Для этой цели, как правило, используется генератор Аркадьева-Маркса и двойная формирующая линия типа Blumlein. В работе^{/1/} была высказана идея и сделана попытка реализации высоковольтной системы на основе импульсного трансформатора. Простота конструкции, небольшие габариты, один коммутирующий разрядник и всего лишь один накопительный конденсатор делают эту идею привлекательной. В настоящей работе описываются характеристики системы, которая использовалась для питания однометровой стримерной камеры.

Экспериментальная установка

Принципиальная схема высоковольтного питания стримерной камеры приведена на рис. 1. Основными узлами установки являются: импульсный трансформатор с коммутирующим разрядником P_1 и накопительной емкостью C_1 и двойная коаксиальная формирующая линия /ФЛ/ с разрядником P_2 . Импульсный трансформатор представляет собой индуктивно связанные контуры с ударным возбуждением^{/2/}. Выходное напряжение такого трансформатора дается в резонансном случае выражением /1/

$$U_2(t) = \frac{U_0}{2} \sqrt{\frac{C_1}{C_2}} [\cos \omega_+ t - \cos \omega_- t]. \quad /1/$$

Здесь C_1 - емкость накопительного конденсатора; C_2 - емкость нагрузки формирующей линии; U_0 - напряжение, до

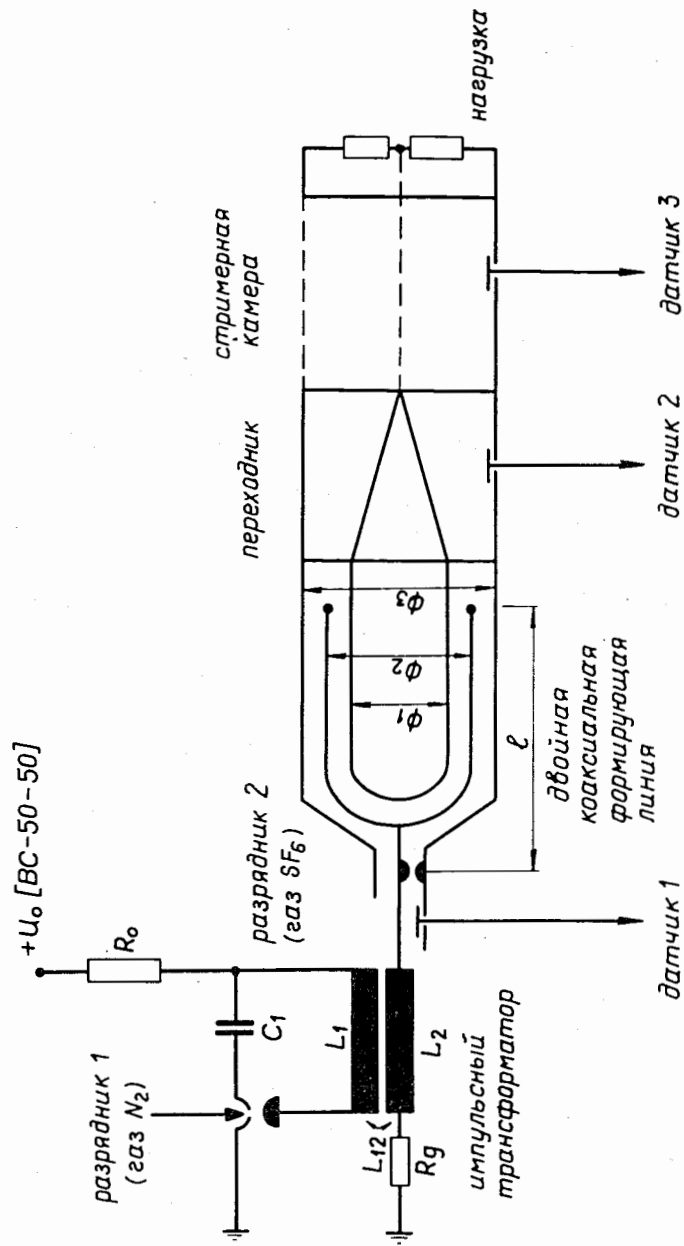


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки, состоящей из импульсного трансформатора, двойной формирующей линии и сферической камеры /1,4 x 1,4 x 0,4 м /.

которого заряжается накопительный конденсатор; ω_+ и ω_- определяются соотношением

$$\omega_+ = \frac{\omega_0}{\sqrt{1-k}}, \quad \omega_- = \frac{\omega_0}{\sqrt{1+k}}, \quad /2/$$

где ω_0 - резонансная частота;

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}} \quad /3/$$

и $k = \frac{L_{12}}{\sqrt{L_1 L_2}}$ - коэффициент связи контуров.

Из приведенной зависимости время достижения первого максимума равно

$$t_{1 \text{ макс.}} \approx \pi \sqrt{1-k} \sqrt{L_1 C_1}. \quad /4/$$

Отсюда видно, что малые времена нарастания импульса могут быть реализованы при $k \rightarrow 1$ и при малой индуктивности первичной обмотки L_1 . Общие формулы для нерезонансного случая и расчеты временной зависимости выходного напряжения для разных коэффициентов связи k можно найти в работе /3/.

Конструкция импульсного трансформатора показана на рис. 2. В первичную обмотку, состоящую из одного витка конусообразной формы, помещается вторичная обмотка, представляющая собой 28 витков медной трубы / ϕ 5 мм/, намотанной на полый цилиндр из оргстекла. Зазор между вторичной и первичной обмотками выбирается так, чтобы получить возможно больший коэффициент связи, с одной стороны, и чтобы обеспечить электрическую прочность зазора, - с другой стороны.

Подсоединение к формирующей линии осуществляется с помощью конического переходника с продольным разрезом для устранения вихревых токов. Первичная обмотка вместе с коническим переходником одновременно служит сосудом для диэлектрика /трансформаторное масло/. К первичной обмотке трансформатора подключается специальный малоиндуктивный накопительный конденсатор

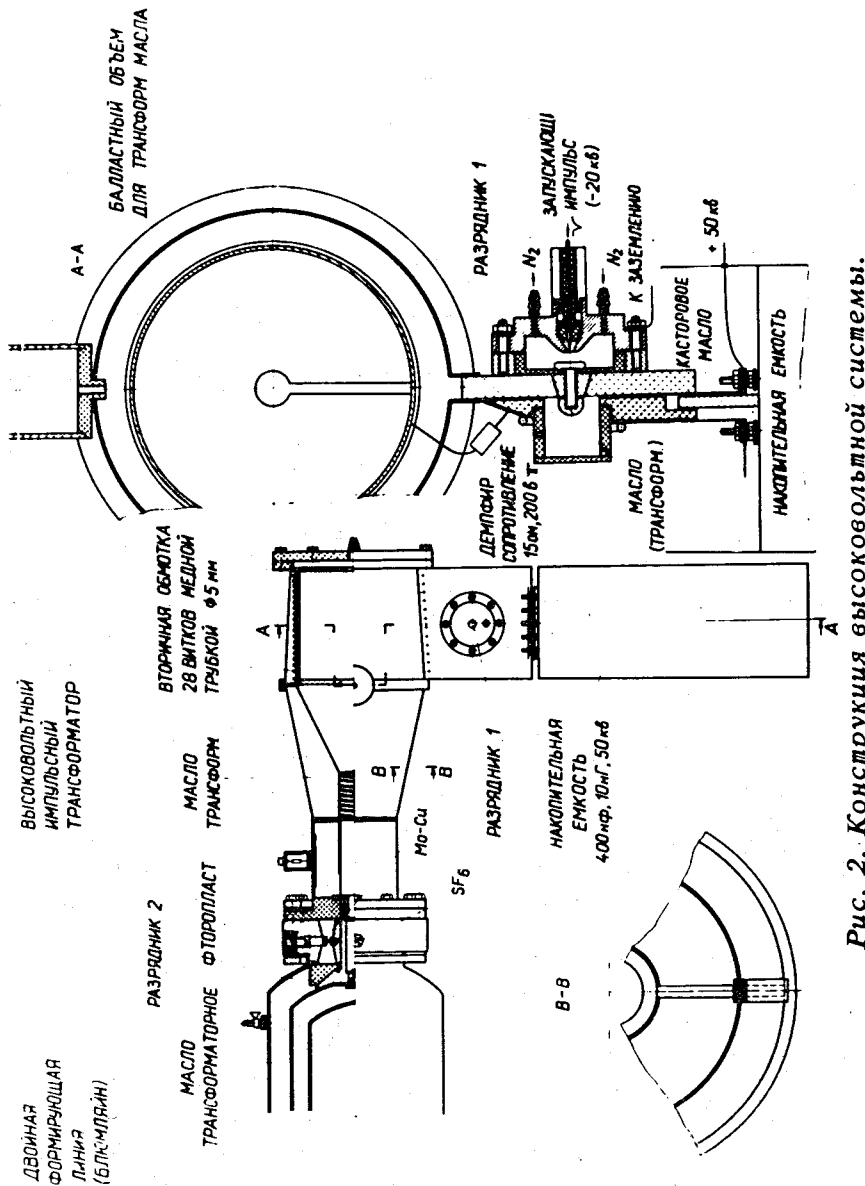


Рис. 2. Конструкция высоковольтной системы.

/ $C_1 = 400 \text{ нФ}$, $L \leq 10 \text{ нГ}$ /, который заряжается от источника постоянного напряжения до 50 кВ.

При срабатывании разрядника P_1 , являющегося управляемым разрядником тригatronного типа, накопительный конденсатор разряжается через первичную обмотку, в результате чего на выходе обмотки появляется осциллирующее напряжение, форма которого показана на рис. 3а и 3б.

Разрядник P_1 является наиболее важным элементом трансформатора, так как он определяет задержку высоковольтного импульса и стабильность срабатываний. Материалом основных электродов разрядника P_1 является компаунд вольфрам-медь, поджигающий электрод изготовлен из вольфрама. Запуск разрядника осуществляется импульсами отрицательной полярности амплитудой 20 кВ, осциллограмма которых приведена на рис. 3в. Зависимость задержки высоковольтного импульса от давления азота в разряднике P_1 приведена на рис. 4. Отсюда видно, что оптимальный диапазон давлений составляет $/1,4 < p_1 < 1,7/ \text{ атм}$.

Импульсы со вторичной обмотки трансформатора подаются на зарядный электрод формирующей линии. Формирующая линия состоит из трех коаксиальных цилиндров и коммутирующего неуправляемого разрядника P_2 , заполненного элегазом (SF_6). Длительность формируемого импульса определяется длиной l зарядного электрода и диэлектриком $/\epsilon = 2,2/$ и в нашем случае равна $\Delta t = 9,8 \text{ нс/м}$. Передний фронт и спад высоковольтного импульса в основном зависят от геометрии разрядника $P_2^{1/4}$. Выбор рабочего давления определяется условием срабатывания разрядника P_2 в первом максимуме напряжения трансформатора. Зависимость амплитуды сформированного импульса при фиксированном зазоре в разряднике P_2 от давления элегаза показана на рис. 5.

Измерение параметров высоковольтных импульсов производилось с помощью трех емкостных датчиков. Кроме того, для контрольных измерений на испытательном стенде применялись один малоиндуктивный омический делитель и один направленный ответвитель /см. Приложение/.

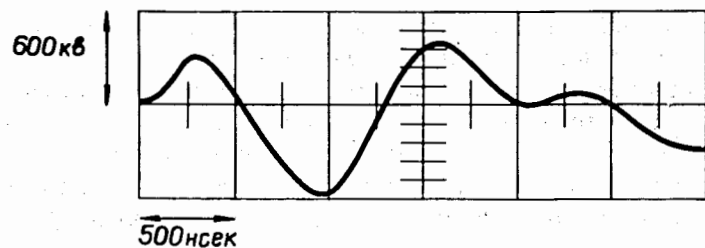


Рис. 3а. Выходное напряжение импульсного трансформатора без срабатывания разрядника P_2 /измерено датчиком 1/.

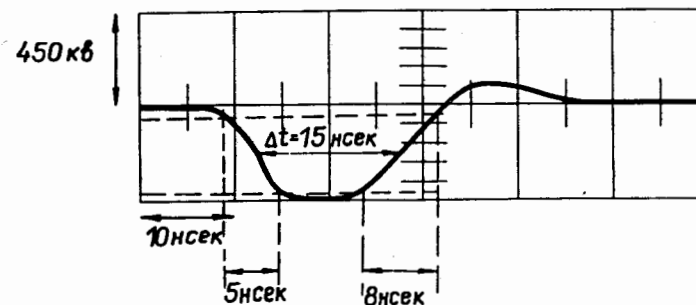


Рис. 3г. Высоковольтный импульс в стримерной камере /измерен датчиком 3/.

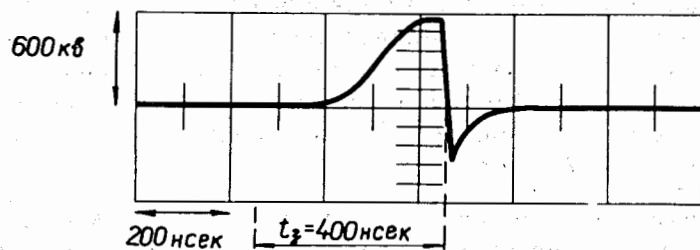


Рис. 3б. Выходное напряжение импульсного трансформатора при срабатывании разрядника P_2 /измерено датчиком 1/.

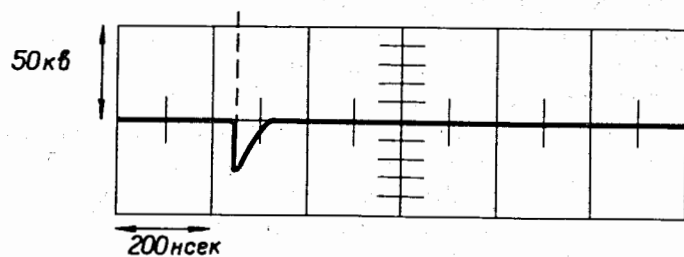


Рис. 3в. Запускающий импульс разрядника P_1 .

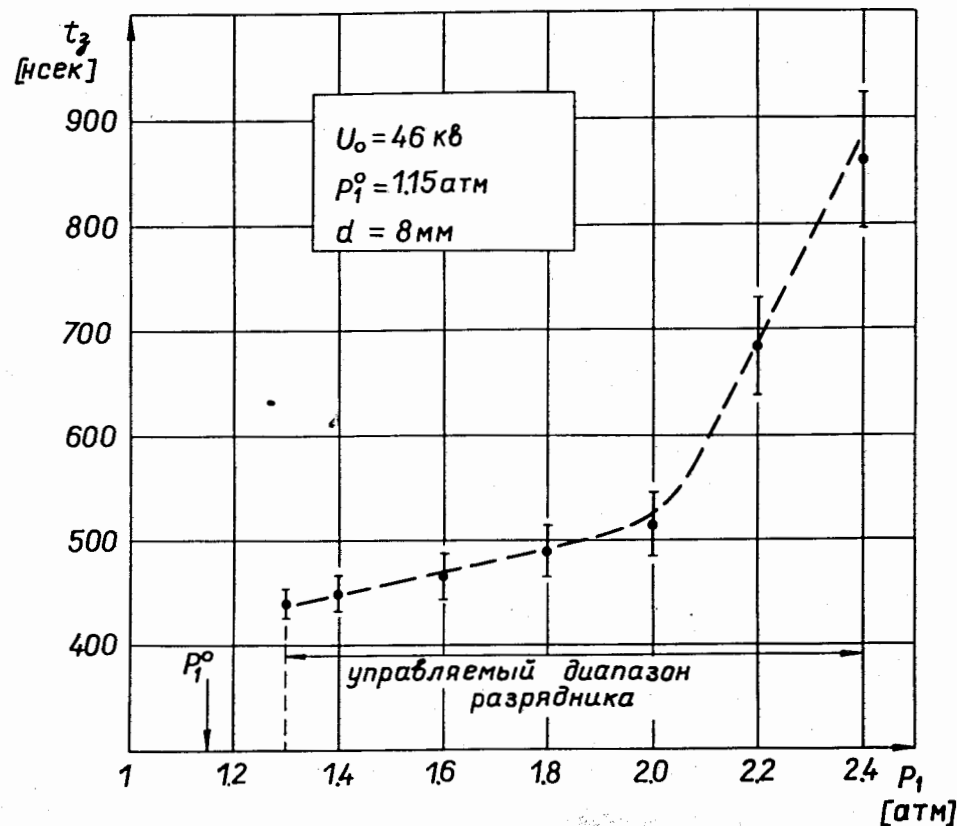


Рис. 4. Зависимость задержки t_3 от давления p_1 /азот/ в разряднике P_1 . Статический пробой в разряднике P_1 происходит при давлении $p_1^0 = 1,15$ атм.

Осциллограмма высоковольтного импульса в стримерной камере показана на рис. 3г. Видно, что импульс имеет следующие параметры:

напряжение	/450±25 /кВ
длительность импульса на полувысоте	15 нс
передний фронт	5 нс
спад	8 нс

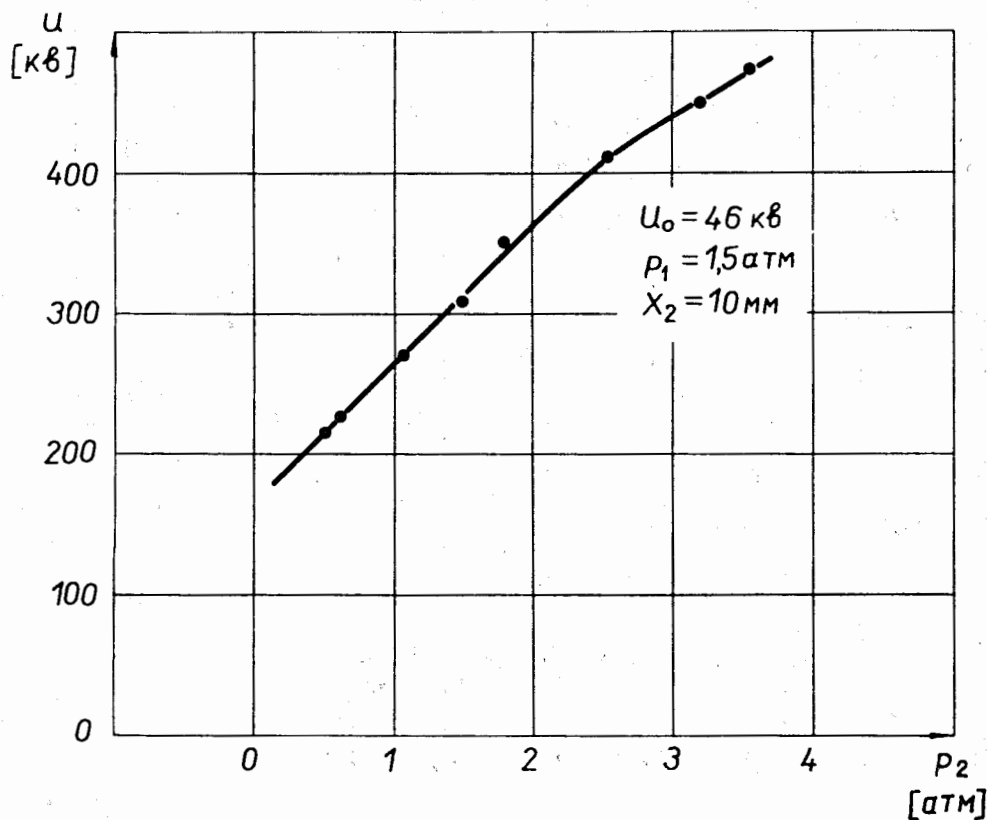


Рис. 5. Зависимость амплитуды сформированного импульса при фиксированном зазоре $x_2=10$ мм/между электродами разрядника P_2 от давления p_2 элегаза SF_6 .

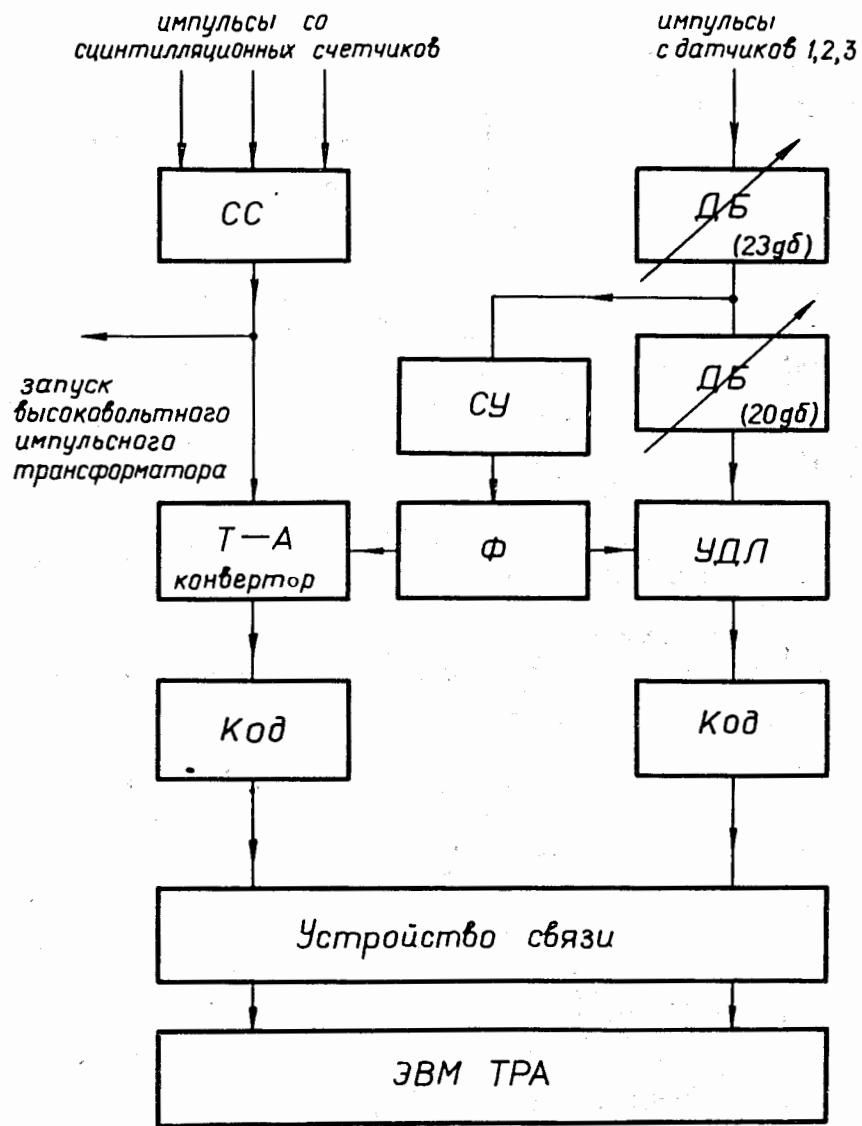


Рис. 6. Принципиальная схема электроники для измерения стабильности амплитуды и задержки высоковольтного импульса. СС - схема совпадения; ДБ - аттенюатор; СУ, Ф - формирователи импульсов; КОД - кодировщик; УДЛ - интегратор /удлинитель/.

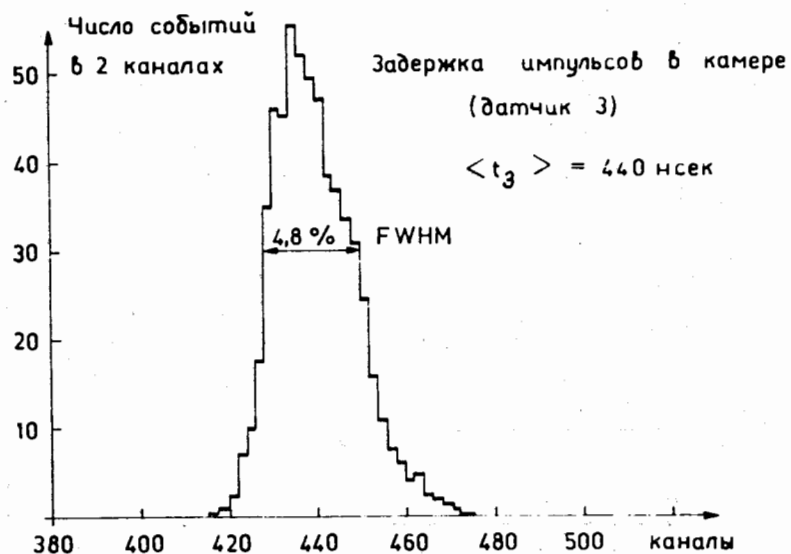
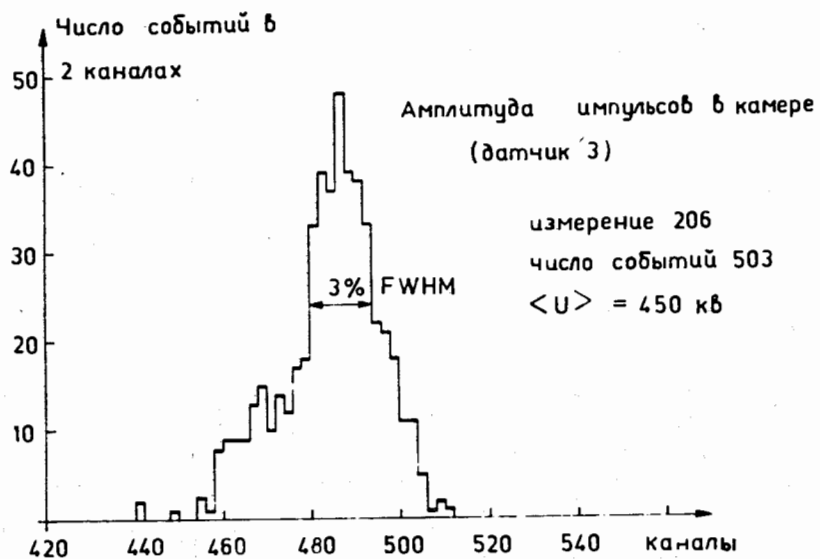


Рис. 7. Распределение амплитуд и задержки импульсов в струйной камере. Средняя амплитуда составляет $\langle U \rangle = /450 \pm 25/ \text{кВ}$, а средняя задержка $\langle t_3 \rangle = /440 \pm 5/ \text{нс}$.

Таблица 1
Параметры высоковольтного питания

Параметр	Величина
Импульсный трансформатор	
Первичный контур	
накопительная емкость	$C_1 = 400 \text{ нФ}$
число витков первичной обмотки	$N_1 = 1$
индуктивность	$L_1 = 0,22 \text{ мкГ}$
омическое сопротивление искрового канала разрядника	$R_1 = 0,04 \text{ Ом}$
Вторичный контур	
число витков	$N_2 = 28$
индуктивность	$L_2 = 120 \text{ мкГ}$
емкость формирующей линии	$C_2 = 0,85 \text{ нФ}$
демпфирующее сопротивление	$R_g = 15 \text{ Ом}$
Связанные контуры	
коэффициент связи	$k = 0,7 \pm 0,1$
коэффициент трансформации	$T = 10 \pm 0,5$
задержка при срабатывании разрядника	
в первом максимуме	$t_{3,1}^{\text{макс.}} = 450 \text{ нс}$
во втором максимуме	$t_{3,2}^{\text{макс.}} = 1100 \text{ нс}$
стабильность задержки	$\Delta t_3 / t_3 = \pm 2,8\%$
Двойная формирующая линия	
внешний диаметр	$\phi_3 = 400 \text{ мм}$
волновое сопротивление	$Z = 25 \text{ Ом}$
длина зарядного электрода	$l = 1,05 \text{ м}$
длительность импульса на полувысоте	$\Delta t = 15 \text{ нс}$
время нарастания импульса на уровне 0,1 - 0,9	$\tau = 5 \text{ нс}$
стабильность амплитуды	$\Delta U / U = \pm 1,5\%$

Поскольку осциллографирование не позволяет измерить амплитуду высоковольтного импульса с точностью лучше 5%, амплитуда и задержка были измерены с помощью электроники, блок-схема которой приведена на рис. 6. Все параметры передавались для обработки в ЭВМ ТРА через устройство связи ^{15/}. Из результатов этих измерений, показанных на рис. 7, видно, что стабильность

высоковольтного импульса $\langle u \rangle = 450 \text{ кВ}$ составляет $\Delta u / u = \pm 1,5\%$, а задержка высоковольтной системы $\langle t_3 \rangle = 440 \text{ нс}$ и имеет нестабильность $\Delta t_3 / t_3 = \pm 2,8\%$. Кроме того, найдено, что стабильность выходного напряжения трансформатора без срабатывания разрядника P_2 равняется $\pm 0,6\%$. Из этого следует, что стабильность амплитуды импульса в стримерной камере в основном определяется разрядником P_2 .

Полезно заметить, что при срабатывании разрядника P_2 во втором максимуме выходное напряжение почти в 2 раза выше, чем при срабатывании в первом максимуме напряжения трансформатора /см. рис. 3а/. Однако задержка при этом увеличивается от 450 до 1100 нс.

Описанная высоковольтная система успешно использовалась для питания стримерной камеры и выдержала более 10^5 срабатываний. В таблице 1 приведены основные характеристики системы.

Авторы считают своим долгом поблагодарить И.Шюлера, З.В.Крумштейна за помощь при проведении измерений, Г.Бома, В.Рорбека, В.М.Суворова и Н.Н.Хованского за полезные обсуждения, а также Е.П.Кудряшова и А.И.Шибасова за техническую помощь.

Приложение

Описание используемых датчиков и способы их калибровки

Датчик 1 представляет собой коаксиальный емкостной делитель, расположенный в переходе между импульсным трансформатором и формирующей линией. Он изготовлен из медной фольги /ширина 100 мм, толщина 0,2 мм/, изолированной от заземляемого корпуса трансформатора слоем промасленной бумаги.

Датчики 2 и 3 представляют собой полосковые емкостные делители, расположенные в переходнике и в стримерной камере. Они изготовлены из медной фольги толщиной 0,2 мм, изолированной от корпуса майларовой пленкой толщиной 0,1 мм.

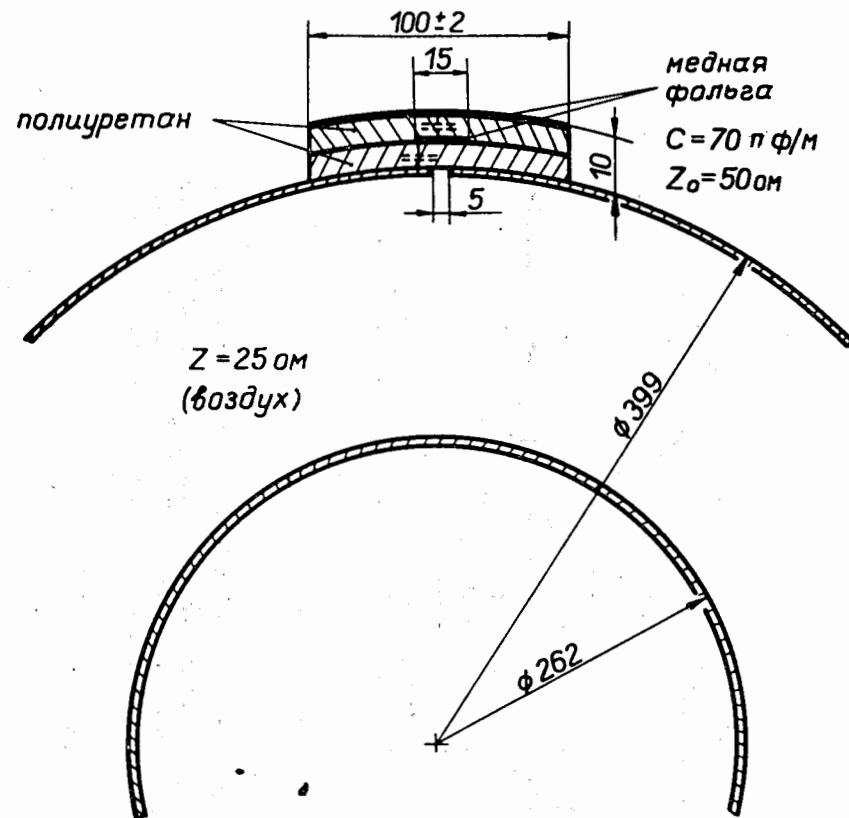


Рис. 8. Внешний направленный ответвитель на выходе формирующей линии.

Для контрольных измерений, проведенных на испытательном стенде, использовался направленный ответвитель, расположенный на внешней поверхности коаксиального волновода длиной 2 м /рис. 8/. Для обеспечения электрической связи в волноводе была сделана щель длиной 1,80 м и шириной 5 мм. В качестве изолятора применялся пенополиуретан /диэлектрическая проницаемость $\epsilon \approx 1$ / толщиной 5 мм. Волновое сопротивление такого ответвителя составляет 50 Ом. На рис. 9 приведена осциллограмма выходного импульса ФЛ, измеренная с помощью направленного ответвителя. Характерной особенностью

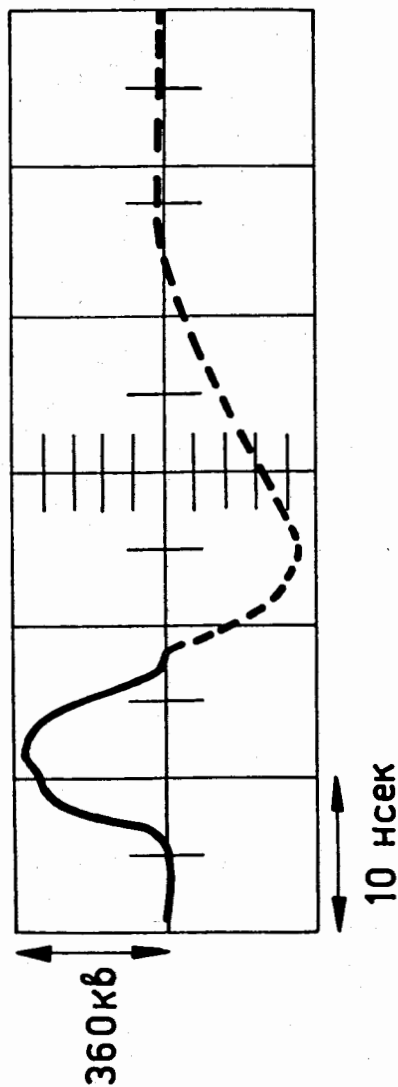


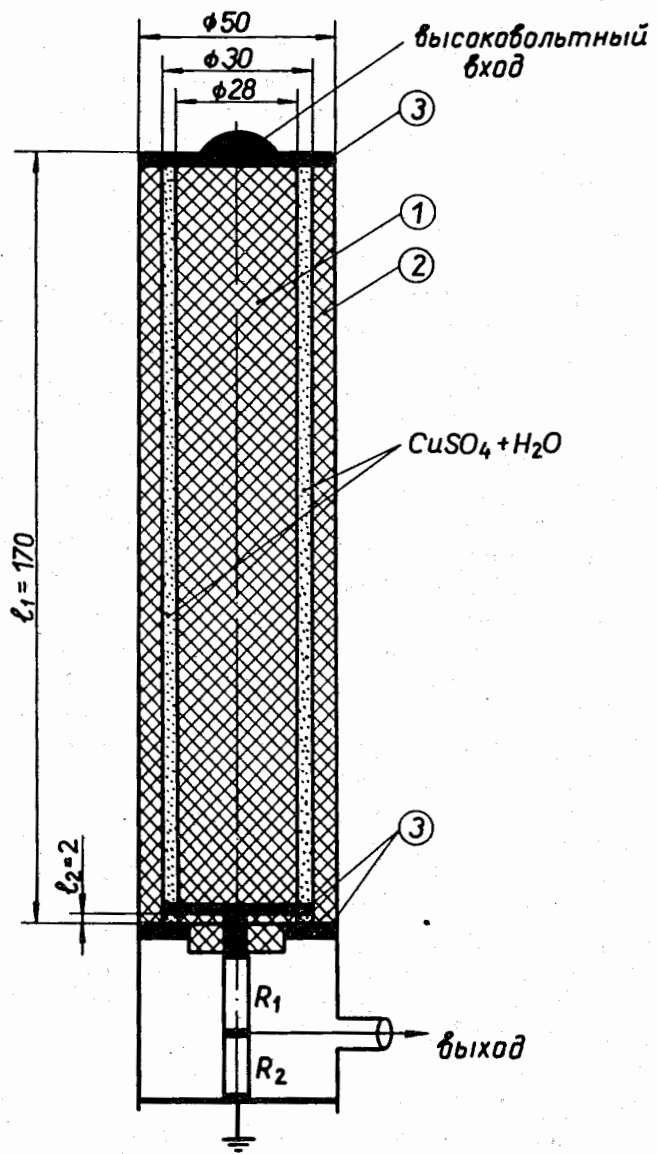
Рис. 9. Осциллограмма выходного напряжения ФЛ, измерена направленным ответвителем. /Длина зарядного электрода ФЛ составляет $l = 0,75$ м и длительность выходного импульса на полувысоте $\Delta t = 7$ нс/.

направленного ответвителя является максимальная длительность передаваемого импульса, зависящая от длины ответвителя, и отрицательный выброс после импульса. Отсюда следует, что осциллограмма дает правильное представление о фронтах и амплитуде измеряемого импульса.

На испытательном стенде использовался также омический датчик /А2/, состоящий из двух делителей /рис. 10/. Первый делитель образован двумя цилиндрическими слоями водного раствора сульфата меди /электрическая проводимость ≈ 45 Ом·см/. А второй делитель выполнен на базе малоиндуктивных объемных резисторов типа ТВО. Выбор раствора CuSO_4 определяется тем, что он выдерживает большие электрические поля /А2/ и восстанавливает свои свойства в случае пробоя. Коэффициент ослабления первого делителя определяется в основном отношением длин l_2/l_1 . Номинал высокоомного плеча второго делителя необходимо выбирать по возможности больше, чтобы уменьшить зависимость общего коэффициента деления от таких факторов, как изменение температуры или изменение химической чистоты раствора. В нашем случае / $R_1 = 1500$ Ом/ при изменении проводимости раствора в 2 раза общий коэффициент деления изменяется менее чем на 1%.

Этот омический делитель служил для измерения полного выходного напряжения ФЛ. Из осциллограмм /рис. 11/ видно, что амплитуда предимпульса/образуемого при зарядке ФЛ/ составляет $\approx 15\%$ от амплитуды основного импульса /измерено без стримерной камеры/. Емкостные датчики 2 и 3 и направленный ответвитель неправильно передают этот предимпульс, поскольку их временная постоянная меньше длительности предимпульса.

Калибровка указанных датчиков /кроме датчика 1/ проводилась в режиме статического пробоя разрядника P_2 при пониженном постоянном напряжении / ≈ 10 кВ/. Пробивное напряжение разрядника P_2 измерялось статическим вольтметром /С-196/ с точностью 1%. Импульсы с датчиков подавались на отклоняющие пластины осциллографа и фотографировались. Преимущество этого способа состоит в том, что для калибровки датчиков исполь-



$R_1 = 1500 \text{ ом}$
 $R_2 = 50 \text{ ом}$
 $K_g = 2500:1$

Рис. 10. Конструкция омического делителя: 1 и 2 - цилиндры из оргстекла, 3 - электроды из меди.

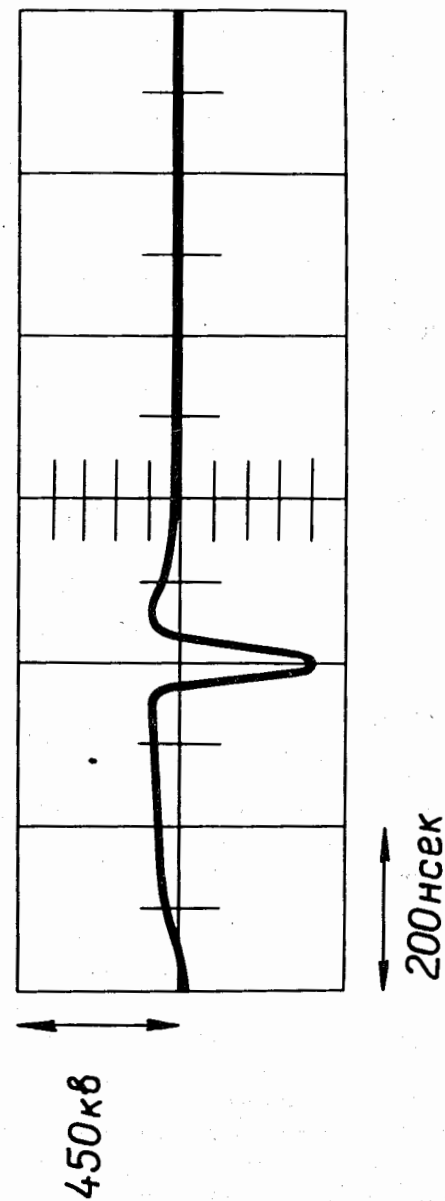


Рис. 11. Осциллограмма выходного напряжения формирующей линии, измерена омическим делителем.

Таблица 2
 Параметры используемых датчиков для измерения высоко-
 вольтных импульсов

Датчик	Коэффициент деления	Время нарастания	Временная постоянная $\tau = C_g R$ /R = 50 Ом, C _г - емкость датчика/
датчик 1	1050:1	не измерено	100 нс
датчик 2	2200:1	2 нс	60 нс
датчик 3	7000:1	2 нс	200 нс
омический делитель	2500:1	2 нс	-
направленный ответвитель /длина 1,80 м/	370:1	2 нс	максимальная передаваемая длительность 12 нс

зуются импульсы, имеющие те же временные параметры, что и измеряемые высоковольтные импульсы.

Датчик 1 нельзя калибровать таким образом, потому что коэффициент ослабления комбинированных емкостно-омических делителей зависит от частоты. Кроме того, для измерения колебания высоковольтного напряжения трансформатора необходимо учитывать емкость измерительного кабеля. Коэффициент деления датчика 1, указанный в таблице 2, является результатом расчета. При этом предполагается, что амплитуда выходного импульса ФЛ соответствует амплитуде выходного напряжения трансформатора в первом максимуме.

Это предположение было подтверждено экспериментально при повторной калибровке датчиков 2 и 3 с помощью дополнительного разрядника на выходе ФЛ. Таким образом, был измерен коэффициент передачи ФЛ: К = 0,95±0,1.

Литература

1. F.Bulos, A.Odian, P.Villa, D.Yount. SLAC-Report No. 74. Stanford Linear Accelerator Centre, June, 1967.
2. D.Finkelstein. Rev.Sci. Instruments, 37, 159 (1966).
3. W.Rohrbeck, K.Trützschler, G.Peter. Forschungsbericht des Zentralinstitutes für Elektronenphysik. Akademie der Wissenschaften der DDR, Berlin 108, Preprint 74-1.
4. F.Rohrbach, J.Bonnet, H.Cathenoz. Nuclear Instruments and Methods, 111, 445-456 (1973).
5. Ю.П.Мереков, Г.Хемниц, Н.Н.Хованский, Д.Позе. Препринт ОИЯИ, 10-9127, Дубна, 1975.
6. H.Amemiya. RCA-Review 28, 241-276 (1967).
7. D.G.Pellinen, J.Smith. Rev.Sci.Instr., 43, 299-301 (1972).

Рукопись поступила в издательский отдел
 13 ноября 1975 года.