

9925

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА



9925

P13 - 9925

Экз. ЧИТ. ЗАЛ

Л.С.Вертоградов, А.В.Желамков, Б.А.Муравьев,  
Х.Рюгер, Х.Том, Г.А.Шелков

**ВЫСОКОВОЛЬТНАЯ СИСТЕМА СПЕКТРОМЕТРА РИСК.**

Часть II. Биполярный формирователь  
наносекундных импульсов

**1976**

P13 - 9925

Л.С.Вертоградов, А.В.Желамков, Б.А.Муравьев,  
Х.Рюгер, Х.Том, Г.А.Шелков

**ВЫСОКОВОЛЬТНАЯ СИСТЕМА СПЕКТРОМЕТРА РИСК.**

**Часть II. Биполярный формирователь  
наносекундных импульсов**

*Направлено в ПТЭ*

Вертоградов Л.С., Желамков А.В. и др.

P13 - 9925

Высоковольтная система спектрометра РИСК.  
Часть II. Биполярный формирователь наносекундных импульсов

Описана конструкция и результаты испытаний формирователя высоковольтных наносекундных импульсов нового типа - биполярного (Blumlein).

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований  
Дубна 1976

Vertogradov L.S., Zhelamkov A.V. et al.

P13 - 9925

The RISK Spectrometer High Voltage System.  
Part II. Double-Polarity Nanosecond Pulse Shaper

Design and test results of the new type high voltage nanosecond pulse shaper (double-polarity blumlein) are described.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research

Dubna 1976

Идея биполярной стримерной камеры и, следовательно, биполярной высоковольтной системы сравнительно нова<sup>/1/</sup>, в литературе нет описания подобных действующих установок. Данная работа посвящена описанию биполярного формирователя наносекундных импульсов, работающего совместно с биполярным генератором высоковольтных импульсов напряжения<sup>/2/</sup>.

В основу конструкции формирователя была положена коаксиальная конфигурация формирующих линий типа Blumlein с цилиндрическими электродами<sup>/3/</sup>/рис. 1/. Формирующие линии импульсов обеих полярностей заключены в общем корпусе, являющемся наружным, заземляемым электродом этих линий. Очевидно, что такая геометрия формирователя соответствует биполярной стримерной камере без среднего заземленного электрода. Для выбора оптимального вещества - изолятора высоко-

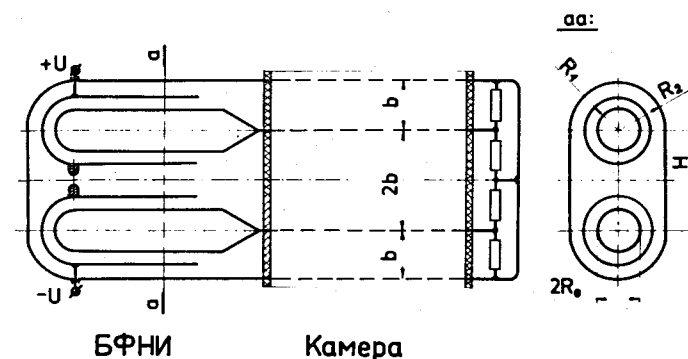


Рис. 1. Схема биполярного варианта формирователя и стримерной камеры.

вольтных электродов были выполнены расчеты величин напряженности электрического поля ( $E_0$ ) на внутренних электродах формировавателя /рис. 2/ в зависимости от величины диэлектрической постоянной ( $\epsilon$ ) изолятора, заполняющего межэлектродное пространство. Расчеты производились\* для трех значений радиуса  $R_2$  внешнего электрода в предположении, что волновое сопротивление каждой из двух коаксиальных линий формировавателя равно 12,5 Ом, а потенциал  $U$ , подаваемый на средний электрод, равен 450 кВ. Из рис. 2 видно, что при  $\epsilon=(4\div 8)$  величина  $E_0$  ( $E_0 > E_1$ ) имеет минимальное значение. Поэтому в качестве изолятора было выбрано касторовое масло, для которого  $\epsilon=4,7$ , а электрическая прочность несколько выше прочности трансформаторного масла<sup>4/</sup>.

При оценке допустимых напряжений между электродами формировавателя эффективная длительность /т.е. время, в течение которого напряжение превышает 63% пробивного напряжения для данного изолятора/ зарядного импульса от генератора предполагалась равной 0,3 мкс. Это существенно для жидких изоляторов, ибо для них величина пробивного напряжения сильно зависит от длительности импульса уже в микросекундном диапазоне<sup>4/</sup>. В этих предположениях мы получили следующие оценки пробивных напряженностей ( $E$ ) для различных изолирующих сред, использованных в конструкции формировавателя, которые приведены в таблице. Там же указаны макси-

\* Для определения  $E_0$ , а также других параметров формировавателя ( $E_1, R_0, R_1$ ), при заданных значениях  $U, R_2, \rho, \epsilon$  методом последовательных приближений решалась система уравнений /см. также обозначения на рис. 2/:

$$E_{j-1} = \frac{U}{R_{j-1} \ln \frac{R_j}{R_{j-1}}}$$

$$R_{j-1} = \exp\left(\ln R_i - \rho \frac{\sqrt{\epsilon}}{60}\right), \quad \text{где } i, j = 1, 2.$$

мальные значения электрических полей ( $E_{\max}$ ) в наиболее "критических" точках конструкции формировавателя, рассчитанные для величины зарядного напряжения  $\pm 450$  кВ.

Таблица

	$E / \text{кВ/см/}$	$E_{\max} / \text{кВ/см/}$	$E/E_{\max}$
Касторовое масло	510	380	1,3
Трансформаторное масло	420	185	2,3
Оргстекло	2000	285	7,3

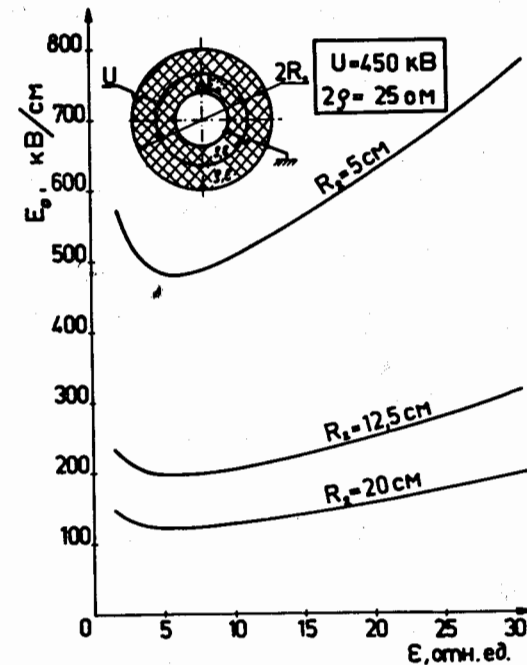


Рис. 2. Расчетная напряженность электрического поля  $E_0$  на внутреннем электроде формировавателя в зависимости от величины диэлектрической постоянной  $\epsilon$ . Расчеты выполнены для трех значений радиуса скругления внешнего электрода:  $R_2 = 5$  см, 12,5 см и 20 см.

Эскиз формирователя и основные размеры приведены на рис. 3. На рис. 4 показан общий вид собранного формирователя. Использование для обеих половин формирователя одного разрядника гарантирует абсолютную одновременность формируемых высоковольтных разнополярных импульсов. Для повышения надежности работы разрядника формирователя в конструкции разрядной камеры использовано минимальное количество твердого изолятора. С этой целью было решено сделать разгруженный вариант разрядной камеры, выровняв давление газа внутри этой камеры и давление касторового масла, заполняющего корпус формирователя. Стенки разрядной камеры обеспечивают только разделение этих двух сред друг от друга, а вся нагрузка действует на металлический корпус формирователя и два изолятора, через которые осуществляется соединение формирователя с генератором и электродами стримерной камеры. В описываемой конструкции стенки разрядной камеры выполнены из тонкой /0,3 мм/ гофрированной фторопластовой пленки в виде "сильфона" с внутренним диаметром 45 мм. Выравнивание давлений в разрядной камере и корпусе формирователя происходит в специальном патрубке, приваренном к верхней части корпуса. Газ в разрядную камеру поступает через каналы, высверленные в высоковольтных зарядных штангах, соединяющих формирователь с генератором. Корпус, изготовленный из нержавеющей стали, и изоляторы из оргстекла рассчитаны на работу при давлении внутри корпуса формирователя до 30 атм. Внутренние цилиндрические электроды формирователя изготовлены из дюралюминия, полусферические головки зарядных электродов, на которых закреплена разрядная камера, выполнены из латуни, электроды разрядника - из нержавеющей стали. Все поверхности внутреннего объема формирователя и электродов тщательно отполированы.

Подчеркнем, что конструкция формирователя в целом была подчинена стремлению добиться минимальной индуктивности цепи коммутации зарядных электродов и тем самым увеличить крутизну фронтов генерируемых импульсов. С этой целью оптимизировался выбор диэлект-

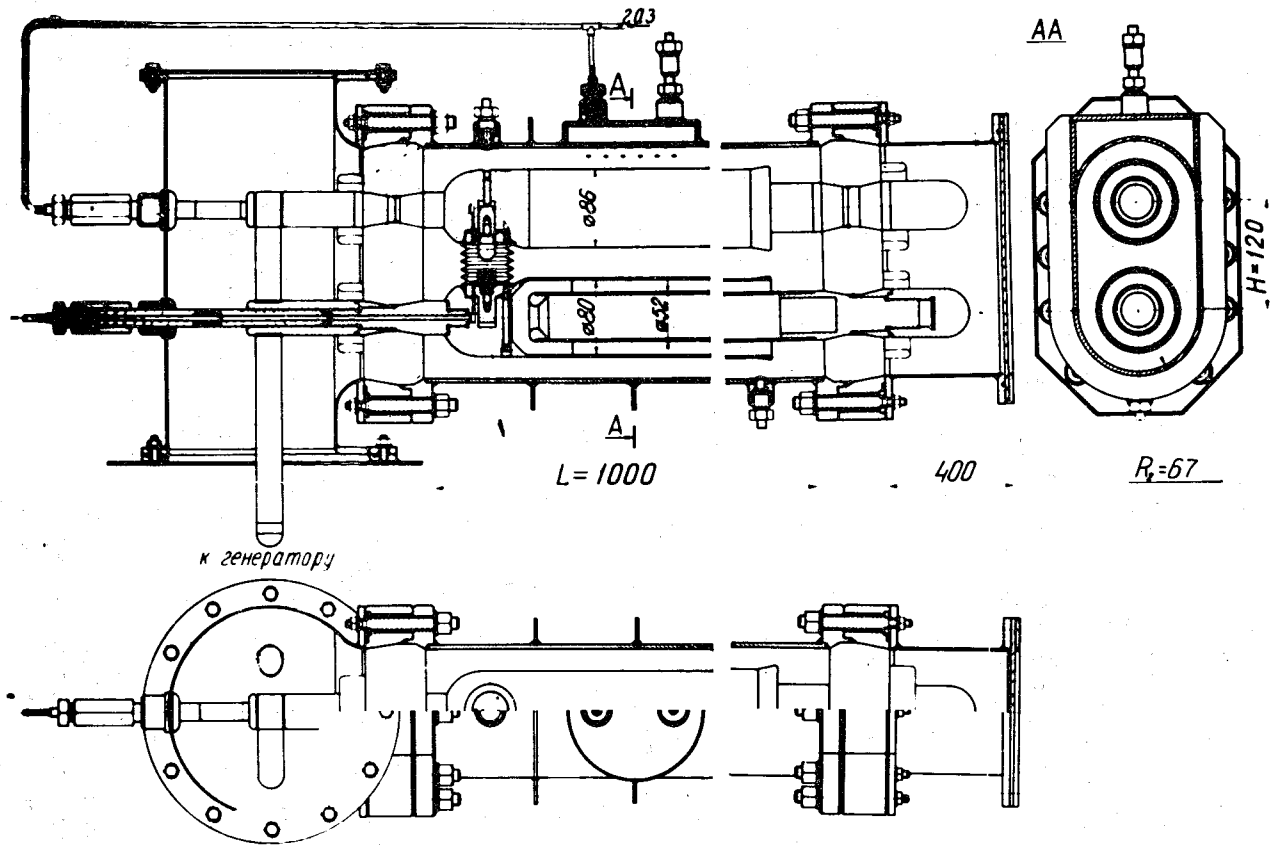


Рис. 3. Сборочный чертеж биполярного формирователя наносекундных импульсов.

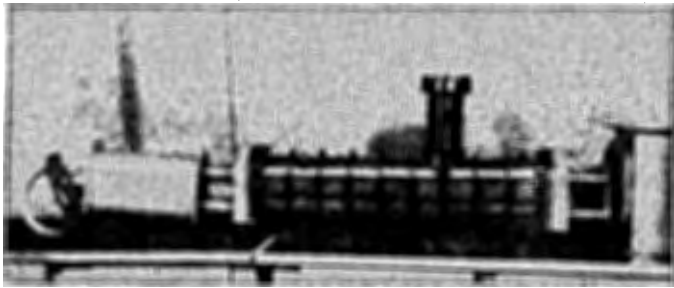


Рис. 4. Внешний вид БФНИ.

рика, что позволило максимально уменьшить поперечное сечение формирователя. С той же целью была обеспечена возможность работы разрядника при давлении в десятки атмосфер.

На рис. 5 показана принципиальная схема модели биполярной высоковольтной системы, собранной на основе биполярного генератора Аркадьева-Маркса<sup>/2/</sup> и описываемого здесь БФНИ. На рисунке изображена временная диаграмма импульсов высоковольтной системы и приведена блок-схема электронной аппаратуры. Приведены все необходимые обозначения.

На выходе формирователя расположен блок нагрузки /рис. 3,4/ /на рис. 3 изображен только кожух/. Он представляет собой часть биполярной передающей линии длиной 30 см с волновым сопротивлением по 25 Ом, оканчивающейся согласующей резисторной нагрузкой по 25 Ом в каждой половине линии. Объем блока нагрузки заполнен трансформаторным маслом. В корпус блока вмонтированы емкостные делители /коэффициент деления  $K_c \approx 340$ /, а параллельно резисторной нагрузке подключены резисторные делители / $K = 680$ /. Формирователь присоединяется к генератору импульсов напряжения через специальный переход. При этом особое внимание обращено на то, чтобы все фланцевые соединения обеспечивали надежный контакт по "земле" - сплошной, без всяких щелей. Блок-схема аппаратуры для измерения параметров высоковольтной системы дана на рис. 6 и аналогична описанной в работе<sup>/2/</sup>.

На рис. 7 приведены осциллограммы высоковольтных импульсов формирователя, сфотографированных с экрана осциллографа. Видно, что резисторный и емкостный датчики БФНИ одинаково передают форму импульсов обеих полярностей. Параметры импульсов:  $t_{\phi} \approx 6$  нс,  $t \approx 25$  нс, величина предимпульса составляет  $\sim 20\%$  амплитуды импульса.

На рис. 8 показаны гистограммы, характеризующие распределения величин амплитуд импульсов  $A_+$ ,  $A_-$ , их комбинаций ( $\Sigma A \equiv |A_+| + |A_-|$ ,  $DA \equiv |A_+| - |A_-|$ ) и времени задержки срабатывания формирователя  $t$ , при значении переходного сопротивления /см. обозначения на рис. 6/, равном 50 Ом. Там же дано распределение величины  $\Delta t = t_+ - t_-$ , характеризующее синхронность формируе-

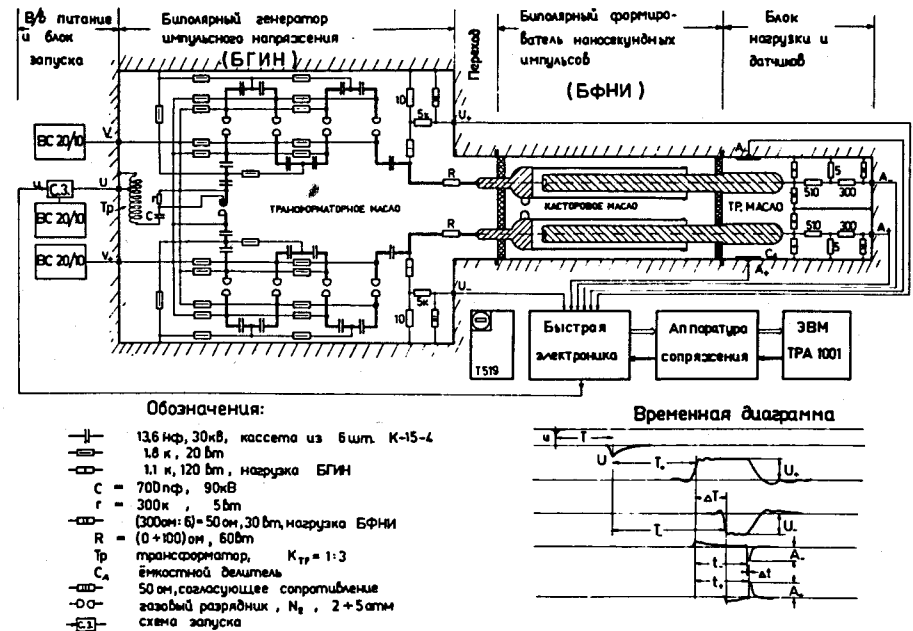


Рис. 5. Принципиальная схема модели биполярной высоковольтной системы. Приведены основные обозначения.

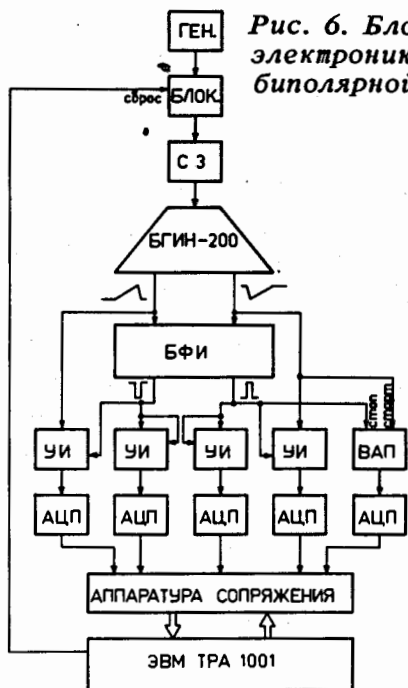


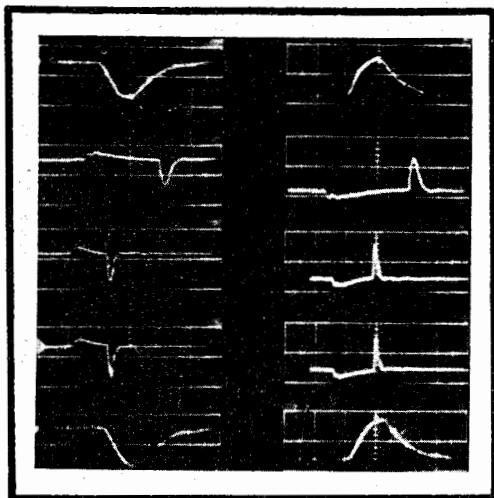
Рис. 6. Блок-схема аппаратуры быстрой электроники для измерения параметров биполярной высоковольтной системы.

мых импульсов. Показано, что  $\delta(\Delta t) = 0,13 \text{ нс}^*$ . Равенство нулю среднего значения  $\Delta t$  гарантируется симметрией обеих линий формирователя.

На рис. 9/г/ приведены величины амплитуды  $A$  сигнала на выходе формирователя и времени  $t$  задержки появления этого сигнала относительно начала импульса генератора в зависимости от давления азота в разряднике формирователя. Из рисунка видно, что при давлении 4,8 атм разрядник БФНИ срабатывает "на вершине", а при давлении 4 атм - "на фронте" импульса генератора. На рис. 9/а, б, в/ сравниваются распределения величин  $A$ ,  $\Sigma A_1 t$  при этих давлениях. При срабатывании разрядника формирователя на фронте импульса генератора

\* Здесь и далее  $\delta(X)$  обозначает ширину на полувысоте распределения величины  $X$ , а  $\eta(x) = \delta(x)/x$ .





10 нсек/дел	С-датчик
50 нсек/дел	
100 нсек/дел	
100 нсек/дел	R-датчик
10 нсек/дел	

Рис. 7. Осциллограммы импульсов, генерируемых БФНИ. Обозначены тип высоковольтных датчиков и цена деления временной шкалы; амплитуда импульсов  $\pm 100$  кВ.

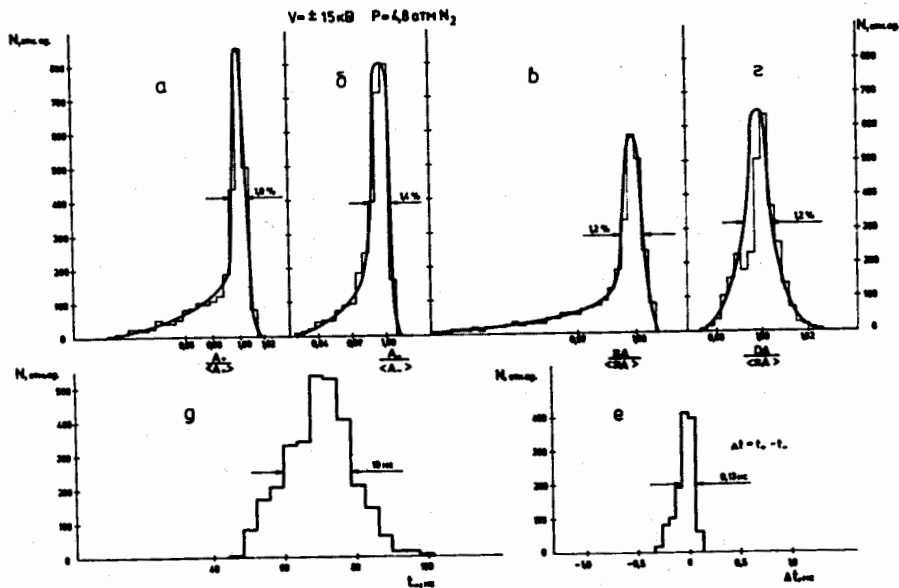


Рис. 8. Гистограммы распределений амплитудных и временных параметров, характеризующих импульсы с БФИ.

амплитудные распределения сигналов формирователя приблизительно в три раза шире аналогичных распределений, полученных при условии, что разрядник БФИ срабатывает на "вершине" импульса генератора. Для временных распределений сигналов с БФИ наблюдается обратная зависимость. Для более подробного исследования связи ширины амплитудных и временных распределений сигналов БФИ в зависимости от выбора рабочей точки по давлению азота в разряднике БФИ, при приеме информации в ЭВМ все события разбивались на пять групп в зависимости от времени задержки срабатывания формирователя. Принцип разбиения на группы ясен из рис. 9/в/. Для событий каждой группы строились амплитудные распределения. Построив зависимость положения центра тяжести амплитудных распределений от времени срабатывания формирователя, можно было определить коэффициент  $k = \Delta A / \Delta t$ , устанавливающий связь между

ширинами амплитудных ( $\Delta A$ ) и временных ( $\Delta t$ ) распределений для разных величин давлений азота в разряднике БФИ. Эти зависимости приведены на рис. 9/д/, из которого видно, что основной причиной амплитудной нестабильности является разброс времени срабатывания разрядника БФИ и что при срабатывании разрядника БФИ на вершине импульса генератора требования к временной стабильности работы разрядника формирователя значительно слабее /в нашем случае приблизительно в три раза по сравнению с режимом работы БФИ,

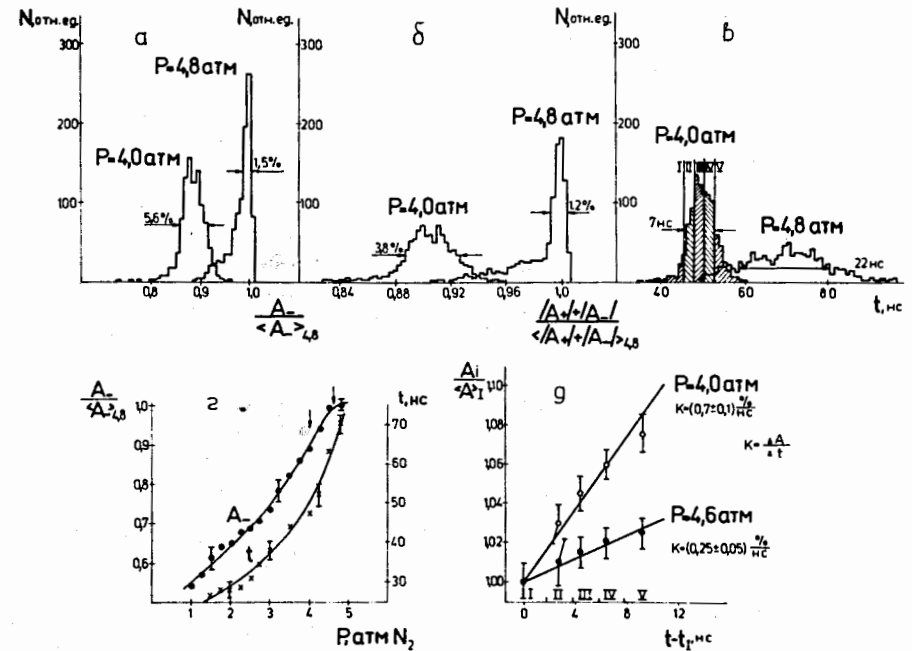


Рис. 9. На гистограммах /а/, /б/ и /в/ сравниваются распределения, соответственно, амплитуды  $A_+$  суммы амплитуд  $A_+ + A_-$  и времени задержки  $t_+$  для двух значений величины давления газа в разряднике формирователя. /г/ - приведены экспериментальные зависимости  $A_+$  и  $t_+$  от давления в разряднике. /д/ - время-амплитудная корреляция импульсов формирователя, измеренная в двух точках по давлению. /в/ - показан принцип разбиения событий на группы в зависимости от величины  $t_+$ .

при котором разрядник формирователя срабатывает на фронте импульса генератора Аркадьева-Маркса/.

Рассмотрим теперь вопрос о взаимной связи амплитуд импульсов разной полярности. Использование общего для обеих половин формирователя разрядника гарантирует в принципе не только абсолютную временную синхронность, но, при условии симметрии обеих половин формирователя, также равенство амплитуд импульсов разной полярности. Действительно, обе половины формирователя "видят" один и тот же скачок напряжения, возникающий после срабатывания разрядника формирователя, но "с разных сторон".

Для проверки этого утверждения необходимо убедиться, что величины средних значений амплитуд импульсов разной полярности равны между собой, а также установить величину и знак корреляции амплитуд сигналов разной полярности БФНИ. Сравнение осциллограмм импульсов показало, что амплитуды сигналов разной полярности с десятипроцентной точностью совпадают между собой. Более точное сравнение требует прецизионной калибровки датчиков высоковольтных импульсов, что представляет собой достаточно сложную процедуру, которая для описываемой в данной работе модели высоковольтной системы не проводилась.

При изучении корреляции амплитуд импульсов, генерируемых биполярным формирователем, мы использовали данные о ширинах распределений суммы ( $\delta(\Sigma A)$ ) и разности ( $\delta(DA)$ ) абсолютных значений амплитуд импульсов разной полярности, а также получаемые в тех же измерениях данные о ширинах распределений амплитуд сигналов разной полярности ( $\delta(A_+)$  и  $\delta(A_-)$ ) порознь. Для ряда измерений, отличающихся друг от друга шириной амплитудных распределений  $A_+$  и  $A_-$  /изменялось давление в разряднике формирователя/ была построена двумерная гистограмма, связывающая между собой экспериментально полученные значения  $\delta(\Sigma A)$  и  $\delta(DA)$  с вычисленной на основании экспериментальных данных о

$\delta(A_+)$  и  $\delta(A_-)$  величиной  $\delta(A) = \sqrt{(\delta A_+)^2 + (\delta A_-)^2}$ . Эти результаты приведены на рис. 10. На том же рисунке

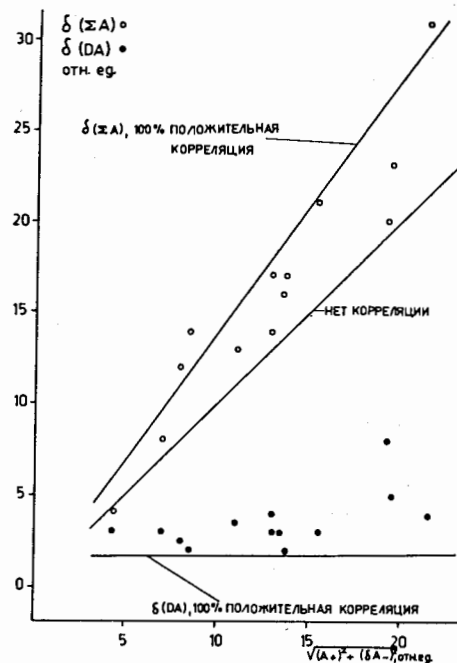


Рис. 10. Экспериментальные данные о корреляции амплитуд импульсов  $A_+$  и  $A_-$ , генерируемых биполярным формирователем. На графике отложены значения ширины распределений суммы и разности амплитуд  $A_+$  и  $A_-$  в зависимости от среднеквадратичной ширины распределений амплитуд  $A_+$  и  $A_-$  порознь. Измерения сделаны при различных давлениях в разряднике БФНИ.

проведены три прямые, которые отражают ожидаемую связь между величинами  $\delta(\Sigma A)$  и  $\delta(DA)$  и  $\delta(A)$  для двух значений коэффициента корреляции  $\lambda$  амплитуд  $A_+$  и  $A_-$

$$[\delta(|A_+| \pm |A_-|)]^2 = (\delta A_+)^2 + (\delta A_-)^2 \pm 2\delta A_+ \cdot \delta A_- \cdot \lambda,$$

где  $\lambda = 0$  соответствует случаю статистической независимости величин  $A_+$  и  $A_-$ ,  $\lambda = +1$  - случаю 100% положительной корреляции величин  $A_+$  и  $A_-$ .

Данные, приведенные на рис. 10, свидетельствуют о наличии положительной корреляции между амплитудами  $A_+$  и  $A_-$ . Корреляция близка к 100%-ной. Это вполне подтверждает приведенное выше утверждение о характере связи между величинами амплитуд импульсов разной полярности, генерируемых БФНИ.

При заданных размерах зазоров между электродами поле (E) в стримерной камере полностью определяется величинами амплитуд высоковольтных импульсов. Так, напряженность поля в среднем зазоре нашей камеры  $E = \Sigma A / 2b$ , а однородность поля в крайних зазорах

камеры характеризуется величиной  $\Delta E = E_1 - E_2 = DA/b$ , где  $b$  - расстояние между электродами, см. *рис. 1*. На основании приведенного выше анализа соотношения между амплитудами  $A_+$  и  $A_-$  можно утверждать, что относительный разброс величины поля одинаков по всему объему камеры:

$$\eta(E) = \frac{\delta(\Sigma A)}{\Sigma A} = \frac{\sqrt{2} \delta(A)}{\Sigma A} = \frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{2} \delta(A_{\pm})}{2|A_{\pm}|} = \frac{\delta(A_{\pm})}{|A_{\pm}|} = \eta(A_{\pm}) = \eta(E_{1,2}).$$

Кроме того, обеспечивается высокая однородность поля по всему объему камеры при каждом отдельном срабатывании

$$\overline{\Delta E} = \overline{DA}/b \approx 0, \quad \eta(\Delta E) = \eta(DA) = \frac{\delta(DA)}{\Sigma A} \approx 0.$$

Заметим, что только второй из этих выводов был правильно предсказан в работе<sup>/1/</sup>, величина же  $\eta(E)$  предполагалась в два раза меньшей.

В заключение авторы считают своим приятным долгом поблагодарить В.И.Петрухина за поддержку этой работы, Г.Бома, Н.Н.Хованского, Г.Хемница, Ю.П.Мерекова, З.В.Крумштейна и Я.В.Гришкевича за помощь в работе и ценные обсуждения, В.И.Левина, В.И.Красина, Е.П.Кудряшова и А.И.Шибасова за помощь при монтаже установки.

### Литература

1. W.Rohrbeck and G.Bom. The Double Blümlein System-a Puls Generator for Driving Very Large Streamer Chamber, Zentralinstitut für Elektronenphysik der Akademie der Wissenschaften der DDR, 1973.
2. Л.С.Вертоградов, А.В.Желамков, Х.Рюгер, Г.А.Шелков. ОИЯИ, Р13-9740, Дубна, 1976.
3. F. Bulos, A.Odian, F.Villa and D.Yount. Streamer Chamber Development. SLAC-74, p.82.
4. Там же. Приложение А, стр. 117.
5. Там же. Приложение В, стр. 127.

Рукопись поступила в издательский отдел  
2 июля 1976 года.