

3264

ПТЗ, 2 (1968) 119.

Экз. чит. зала

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

13 - 3264



А.Т. Матюшин, В.Т. Матюшин, Р. Фирковский,  
М.Н. Хачатурян

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ГЕНЕРАТОРЫ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСОВ  
ДЛЯ КАБЕЛЬНОГО ПИТАНИЯ  
ИСКРОВЫХ КАМЕР С ПРОМЕЖУТКОМ 1-15 СМ

1967.

**13 - 3264**

**А.Т. Матюшин, В.Т. Матюшин, Р. Фирковский,  
М.Н. Хачатурян**

**ГЕНЕРАТОРЫ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСОВ  
ДЛЯ КАБЕЛЬНОГО ПИТАНИЯ  
ИСКРОВЫХ КАМЕР С ПРОМЕЖУТКОМ 1-15 СМ**

В<sup>/1/</sup> описана система питания, управления и контроля искровых камер, используемая в экспериментах на синхрофазотроне ОИЯИ<sup>/2,3/</sup>. Высоковольтные импульсы для питания камер подаются от генераторов ГИН по кабелям; применяемые в системе генераторы для кабельного питания позволяют обеспечить работу камер с зазорами в диапазоне 1-15 см.

Наиболее употребительной схемой устройства, формирующего высоковольтный импульс, является схема с коммутацией заряженной емкости. На рис. 1 приведены принципиальные (а) и эквивалентные (б, в-г, д-е) последовательно упрощаемые для облегчения расчёта схемы кабельного питания камер. Здесь  $R_3$  - зарядное сопротивление,  $C_3$  - зарядная емкость, разряжающаяся при срабатывании коммутатора К на кабель длиной  $l_k$ ,  $C$  - ёмкость камеры,  $R$  - шунтирующее сопротивление,  $E_3$  - общее зарядное напряжение,  $U_0$  - напряжение на электродах камеры.  $R_k, L_k$  - сопротивление (в общем случае нелинейное) и индуктивность коммутатора,  $L_r, L_0$  - индуктивности подводящих проводов,  $w$  - волновое сопротивление кабеля,  $U_{\Pi}$  - амплитуда падающей волны. Схема справедлива для достаточно длинного кабеля (на кабеле "укладывается" по крайней мере двойной фронт передаваемого импульса) и для времени переходного процесса, предшествующего пробоем искрового промежутка камеры.

На основании известных соотношений (см., например,<sup>/4/</sup>) можно показать, что для подобных систем время нарастания фронта импульса на электродах искровой камеры  $t_0$  определяется в основном временем реакции  $t_{00}$  системы кабель-камера и в меньшей степени зависит от времени коммутации разрядного устройства  $t_k$ . В самом деле, поскольку  $t_0 = \sqrt{t_k^2 + t_{00}^2}$  и  $t_{00} > t_k$  для реальных систем с камерами больших размеров, то  $t_{00} \approx t_0$  или, точнее,<sup>/4/</sup>  
 $t_0 = \frac{t_k}{2} + t_{00}$ . Поэтому при отсутствии дополнительных формирующих устройств на выходе кабеля определенным удовлетворительным компромиссом между

требуемыми параметрами импульса на электродах камеры и сравнительной простотой выполнения генератора для кабельного питания следует признать употребление в качестве коммутирующих устройств управляемого воздушного разрядника при нормальных условиях, схемы умножения напряжения Аркадьева-Маркса с такого рода разрядниками и водородного тиратрона. Как известно<sup>14/</sup>,

$t_k$  в воздухе при нормальных условиях в зависимости от степени ультрафиолетового облучения изменяется от 7 до 21 нсек. Считая коммутатор безинерционным, в схеме рис. 1 д-е, можно рассчитать переходной процесс на электродах камеры без учёта отражений от генератора. При этом напряжение

$$U_C = E_3 \beta \frac{a_H}{a_H - 1} (e^{-\frac{r}{a_H}} - e^{-r})$$

Амплитуда импульса

$$U_{CM} = E \beta e^{-\ln[a_H / (a_H - 1)]}$$

Здесь

$$\beta = \frac{wR}{(R_k + w)(w + R)} = \frac{R}{w + R_k}; \quad a = \frac{C_3}{C} \frac{R_k + w}{R_3};$$

$$T = \frac{t}{r_c}; \quad r_0 = CR_3; \quad R_3 = wR / (R + w).$$

Форма, амплитуда и длительность импульса могут быть найдены по кривым рис. 2, построенным по этим соотношениям. Соотношения и графики действительны, естественно, для времени, ограниченного временем формирования разряда в камере.

Величину сопротивления  $R_k$  можно оценить из следующих соображений. Как известно (см., например,<sup>14,5/</sup>), сопротивление искры в соответствии с эмпирической формулой Теплера пропорционально длине  $l$  искрового промежутка и обратно пропорционально количеству электричества  $q$ , прошедшему через промежуток от начала разряда, т.е.  $r_0 = kl / q$ , где  $k$  — постоянная. При работе разрядника непосредственно на емкость  $C$  можно считать, что

начале импульса происходит заряд емкости, которая к концу фронта полностью заряжается. Тогда  $q_0 = q_3 C / (C + C_3)$ ,  $q_3 = C_3 E_3$  и  $q_0 = E_3 C$ . Для воздушного разрядника при нормальных условиях пробивной градиент поля равен  $\sim 30$  кВ/см, и к концу фронта  $r_u \approx 5 \cdot 10^{-9} / C$  при  $k = 1,5 \cdot 10^{-4}$  в сек/см<sup>5/2</sup>. Аппроксимируя кривую спада напряжения на разряднике экспонентой и принимая постоянную времени экспоненты на основании  $1/4 r_k = 5 \cdot 10^{-9}$  сек, можно распространить полученные результаты на случай кабельного питания, т.е., считая по-прежнему сопротивление  $r_u$  линейным и равным  $r_u = 5 \frac{10^{-9}}{C_3}$ , определить амплитуду импульса на входе кабеля:

$$U_{\text{ПМ}} = E k_{\Gamma} \exp[-\ell_{\text{ПМ}} / (m-1)],$$

где

$$m = r_3 / r_k, \quad r_3 = C_3 (R + r_u), \quad k_{\Gamma} = \frac{m-1}{m}.$$

Расчет амплитуды можно произвести по графикам рис. 2, полагая

$$m = a_H, \quad \beta = 0,5 k_2, \quad U_{\text{СМ}} = U_{\text{М}}, \quad U_{\text{С}} = U_{\text{П}}.$$

Поскольку  $t_k < t_{\text{оэ}}$ , можно считать, что  $U_{\text{ПМ}}$  — амплитуда, полученная в схеме с безынерционным коммутатором и линейным сопротивлением  $R_k$ :

$$R_k = r_u \{ m [\exp \ell_{\text{ПМ}} / (m-1) - 1] + 1 \} = (3-5) r_u \quad (\text{в интервале значений } n = 2 + 50).$$

Для схемы умножения Аркадьева-Маркса сопротивление  $r_u$  за счет увеличения числа искровых промежутков увеличивается, и для его учета можно использовать формулу

$$r_{uN} = r_u \sum_{i=1}^N \frac{1}{i^2},$$

где  $N$  — число ступеней умножения.

Указанные соотношения достаточно хорошо, в пределах точности измерения, согласуются с экспериментально полученными результатами.

На рис. 3 представлены характеристики импульса, рассчитанные по приведенным выше соотношениям: амплитуда импульса на выходе генератора (т.е. на входе кабеля) —  $U_{\text{ГМ}}$ , амплитуда импульса на выходе кабеля —  $U_{\text{СМ}}$  при нагрузке его емкостью камеры  $C/\lambda = 100$  пф и длительность им-

пульса на полувысоте  $t_{0,5}$  в зависимости от числа  $n$  включенных на выходе генератора кабелей при различных значениях общего зарядного напряжения  $E_3$ . Точками обозначены экспериментальные значения полученных величин. Общая емкость генератора в ударе  $\approx 1500$  пф, волновое сопротивление кабеля  $w = 75$  ом (РК-8). Время нарастания импульса на выходе генератора  $t_k \approx 10-16$  нсек,  $t_{0,0} = 2,2 w C = 16$  нсек, общее время нарастания фронта на пластинах камеры  $t_0 = \frac{t_k}{2} + t_{0,0} = 20-25$  нсек и соответствует экспериментально определенным значениям.

Для данного генератора экспериментально определенное сопротивление  $R_k = 20$  ом, рассчитанное  $\approx 19-22$  ом. Емкости ступеней генераторов (19 шт., 470 пф) смонтированы в двух противостоящих колонках, одна из которых закреплена в центрах и подвижна относительно другой, что позволяет менять межэлектродное расстояние всех разрядных промежутков одновременно с помощью тяги, ручка которой выведена на переднюю панель генератора. Запуск генератора осуществляется импульсом с амплитудой 5-20 кв. При большой амплитуде характеристики запуска устойчивей.

На рис. 4 а приведена принципиальная схема генератора высоковольтных импульсов с водородным тиратроном на напряжение 25 кв. Особенностью схемы является употребление в ней специально подобранного транзистора  $T_1$  типа П406, работающего в лавинном режиме, и формирующего трансформатора  $TP_2$ , что обеспечивает получение запускающего импульса с амплитудой 40-50 вольт и длительностью 0,5-0,6 мксек. В остальном схема обычная. Входной импульс любой полярности с амплитудой не менее 0,5 вольта (в зависимости от длительности) поступает на базу транзистора  $T_1$ , порог которого устанавливается потенциометром. Трансформаторы  $TP_1$  и  $TP_2$  изготовлены на ферритовых кольцах Ф-800 типа К15 х 6 х 4,5.  $TP_1$  содержит 2-3 витка,  $TP_2$  - 8-10 витков провода ПЭЛШО  $\phi 0,4$  мм, намотанных в два провода. Лампы  $L_1$  типа 6В2П и  $L_2$  типа ГИ-30 в обычном состоянии заперты отрицательным смещением и опираются только на время, определяемое длительностью импульса, сформированного с помощью трансформатора  $TP_2$ , что облегчает режим их работы.  $TP_3$  меняет полярность импульса, снимаемого с анода  $L_2$  для обеспечения поджига водородного тиратрона  $L_3$ . Этот трансформатор изготовлен на двух сложенных вместе кольцах типа ФМ2000 К32х16х8 и имеет 30 витков двойного монтажного провода.

Выход рассчитан на подключение кабеля типа РК-100-11-7 (6 отдельных выходов), по которому высоковольтный импульс поступает на искровую камеру.

В левой части рис. 46 приведены характеристики задержки запуска тиратрона на  $t_{зт}$  в зависимости от напряжений накала  $U_H$  и генератора водорода  $U_{ГВ}$  для разных экземпляров тиратрона при фиксированном напряжении анода  $E_a = 15$  кв (напряжение анода ГИ-30  $E_0 = 5$  кв).

Зависимость задержки от  $E_a$  и  $E_0$  при фиксированных значениях  $U_H = U_{ГВ} = 6,3$  в показана в правой части рис. 46. Амплитуда импульса на выходе генератора, как и следовало ожидать, при распространении результатов определения  $R_k, r_k$ , приведенных выше для ГИН 180<sup>/1/</sup>, на рассматриваемый случай не зависит от числа включенных кабелей, поскольку каждый кабель включается на свою емкость. Фронт импульса на входе кабеля - 15+25 нсек, зарядная емкость  $C_{10} - C_{15}$  равна 2200 пф.

Определенным достоинством тиратрона является возможность изменения напряжения анода без изменения временных параметров импульсов на выходе. Недостаток - значительная мощность, потребляемая по накальной цепи, и задержка, имеющая тенденцию увеличиваться со временем. В случае необходимости уменьшения задержки вместо тиратрона включается управляемый воздушный разрядник (см., например, <sup>/6/</sup>), который обеспечивает примерно те же параметры выходных импульсов, но требует подстройки при изменении напряжения на нем.

Интересно определить возможности применения описанной методики расчета параметров импульса при использовании в генераторе разрядников под давлением и в тех же условиях применения - работа на омическую нагрузку при длительности импульса менее микросекунды. Оценку параметров импульса в этом случае удобно произвести по результатам работы <sup>/7/</sup>.

В работе <sup>/7/</sup> приводятся расчетные характеристики, по которым можно определить фронт и амплитуду импульса описанного генератора:  $U_{пм}/E = 0,76$ ;  $t_{ф} = 1,3$  нсек (один генератор) и  $U_{пм}/E = 0,88$ ;  $t_{ф} = 1,6$  нсек (параллельное включение генераторов). С помощью описанной здесь методики упрощенного расчета, учитывая уменьшение времени коммутации разрядника под давлением  $r_{кР}$ , на основании <sup>/4/</sup> можно записать

$$r_{кР} = \frac{r_k}{p},$$

где  $p$  - давление (в атмосферах),  $r_k$  - постоянная времени коммутации, считая по-прежнему  $L_k / (w + R) \leq r_{kp}$  и зная параметры генератора работы /7/ ( $N = 10$ ,  $C_3 = 70 \cdot 10^{-12}$  ф,  $L_k = 10^{-7}$  гн,  $w = 85$  ом,  $p = 6$  атм), можно рассчитать искомые величины:  $U_{\text{пм}} / E = 0,56$ ;  $t_{\text{ф}} = 1,25$  нсек (один генератор),  $U_{\text{пм}} / E = 0,7$ ;  $t = 1,5$  нсек (параллельное включение генераторов).

Полученная точность определения амплитуды импульса и длительности его фронта в большинстве случаев достаточна, а методика ввиду сравнительной простоты удобна для предварительных оценок параметров импульсов генераторов описанных типов.

В заключение авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность А.С.Гаврилову за любезное предоставление транзисторов типа П406 для работы в лавинном режиме, Н.С.Глаголевой за выполнение ряда схем, Ю.А.Каржавину за постоянное внимание и помощь в работе, Г.Даминову и А.Н.Любенко за выполнение монтажа и испытаний некоторых схем и делителей, В.А.Шустину и Н.Печёнову за оперативное выполнение многочисленных фотографических работ.

#### Л и т е р а т у р а

1. Н.С.Глаголева, Г.Даминов и др. Блочная система питания, управления и контроля искровых камер с промежутком 1-15 см для экспериментов на ускорителе. Препринт ОИЯИ, 13-3207, Дубна, 1967.
2. M.A. Azimov, A.S. Belousov et al. Nev Method for Measuring the effective Mass in the decays:  $x \rightarrow \gamma + \gamma$ . Препринт ОИЯИ Е 13-3148, Дубна, 1966.
3. M.A. Azimov, A.S. Belousov et al. Observation of the  $(e^+ e^-)$  - decay modes of neutral vector mesons. Препринт ОИЯИ, Е1-3148, Дубна, 1967.
4. Г.А.Воробьев, Г.А.Месяц. Техника формирования высоковольтных наносекундных импульсов. Госатомиздат, 1963.
5. С.М.Смирнов, П.В.Терентьев. Генераторы импульсов высокого напряжения. Энергия, М-Л, 1964.
6. Н.С.Глаголева, Ю.А.Каржавин, А.Т.Матюшин, И.Шянагл. Система питания многопромежуточных искровых камер. Препринт ОИЯИ, 2671, Дубна, 1966.
7. E. Cygi and F. Schneider. A nanosecond pulse generator of 200 kv amplitude, CERN 64-46 (1964).

Рукопись поступила в издательский отдел

7 апреля 1967 года.



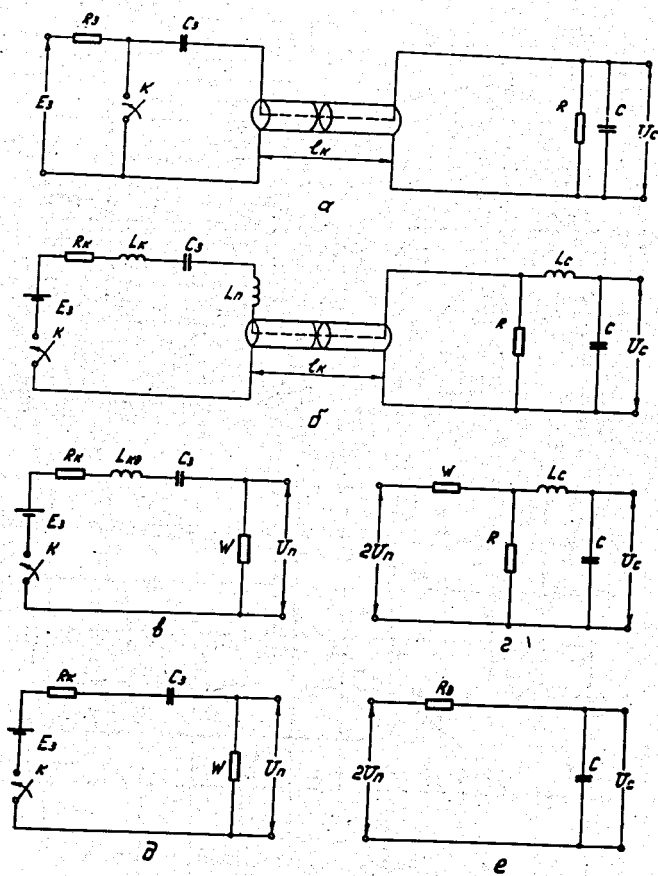


Рис . 1. Принципиальные и эквивалентные схемы работы разрядных устройств для кабельного питания искровых камер.

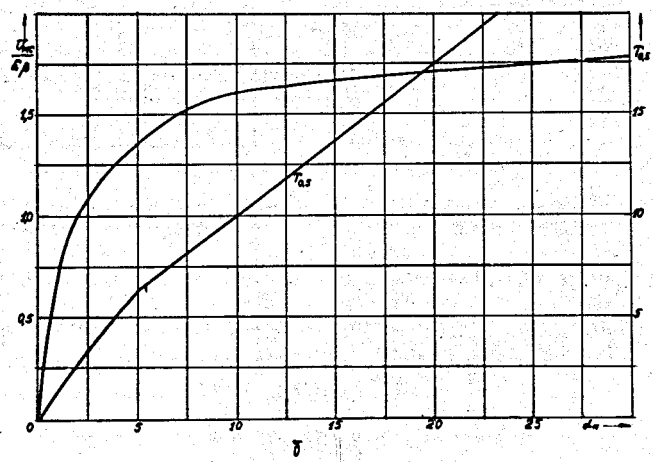
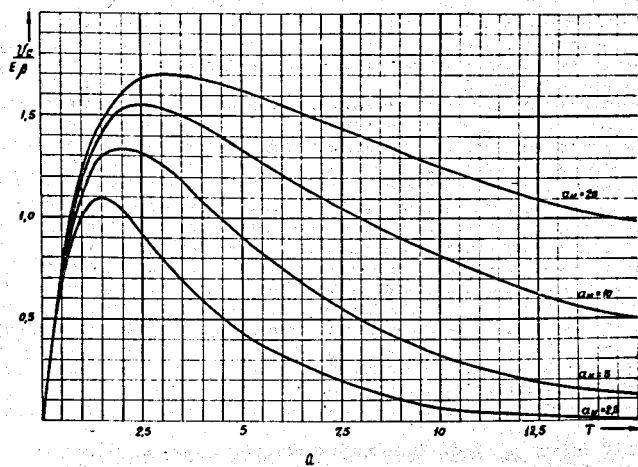


Рис. 2. Графики для определения формы (а) амплитуды и длительности (б) импульса на пластинах камеры при кабельном питании.

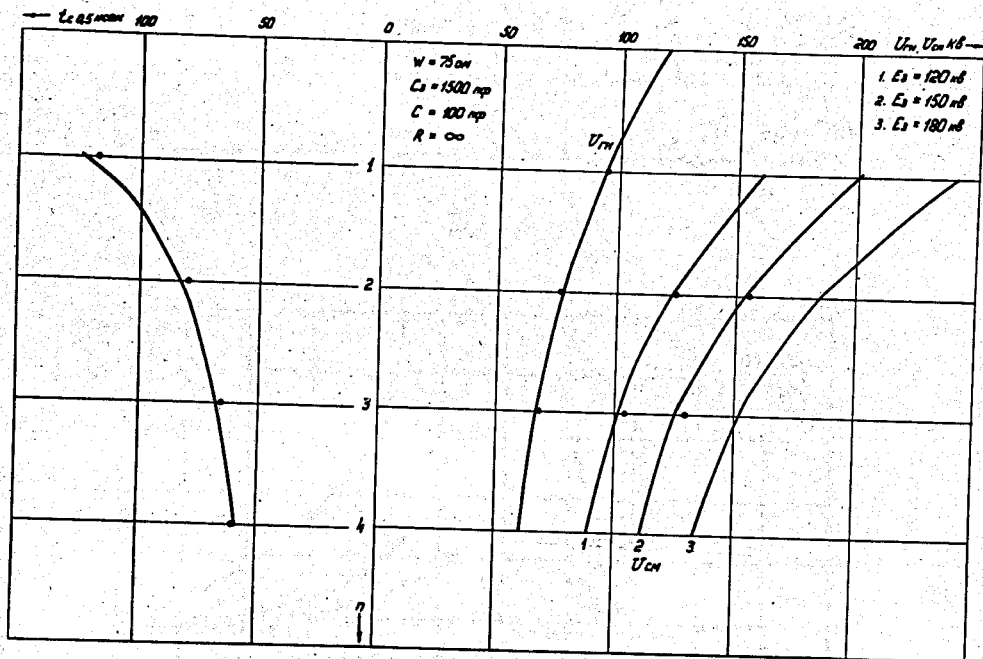
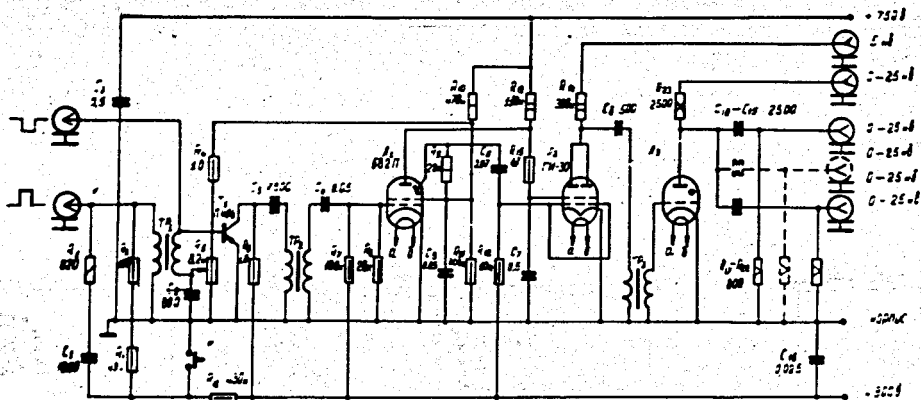
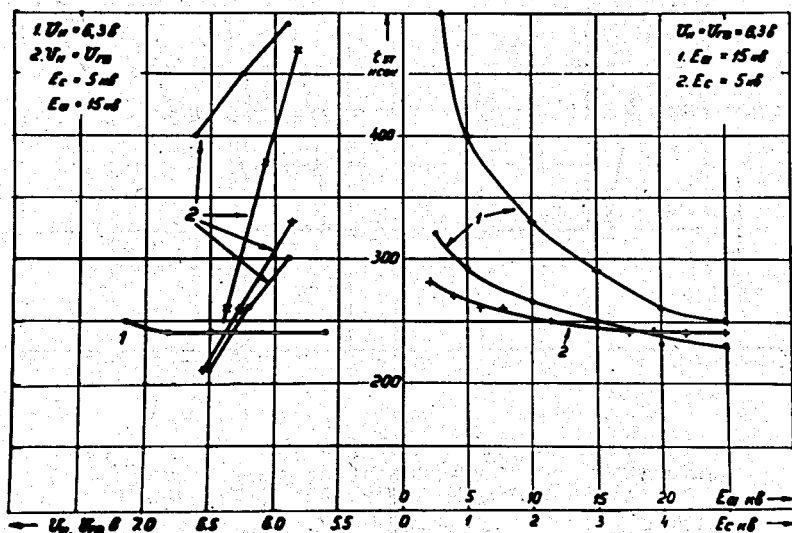


Рис. 3. Зависимость выходной амплитуды генератора ( $U_{ГМ}$ ) на кабеле, амплитуды на пластинах камеры ( $U_{СМ}$ ) с ёмкостью  $C/p = 100$  пф и длительности импульса на полувысоте  $t_{0,5}$  от числа кабелей  $n$ , нагружающих генератор. Точками отмечены экспериментальные значения.



а



б

Рис. 4. Принципиальная схема генератора с водородным тириатроном для работы на кабель (а) и характеристики задержки запуска тириатрона от питающих напряжений для нескольких экземпляров (б).