

## Тригатроны на рабочее напряжение до 1 МВ с наносекундным временем срабатывания

*Предложен 4-х-канальный тригатрон на напряжение 400 кВ и коммутируемый ток до 280 кА, в котором получены время запаздывания пробоя  $t_3 \approx 1$  нс и его разброс  $\Delta t_3 < 1$  нс. Отличительными особенностями предложенного тригатрона являются размещение управляющего электрода в высоковольтном основном электроде положительной полярности, причем управляющий импульс имеет также положительную полярность, и наличие металлического защитного экрана в разрядной камере тригатрона. Выработаны требования к тригатронам на напряжение до 1 МВ с наносекундным временем срабатывания.*

*Запропоновано 4-х-канальний тригатрон на напругу 400 кВ і струм, що комутується, до 280 кА, в якому одержані час запізнення пробую  $t_3 \approx 1$  нс і його розкид  $\Delta t_3 < 1$  нс. Відмінною особливістю запропонованого тригатрону є розміщення керуючого електроду в високовольтному основному електроді позитивної полярності, причому керуючий імпульс має також позитивну полярність, та наявність металевого захисного екрану у розрядній камері тригатрону. Вироблено вимоги до тригатронів на напругу до 1 МВ з наносекундним часом спрацювання.*

**Введение.** В высоковольтных импульсных генераторах для научных исследований и в электро-технологических установках нередко возникает задача получения импульсов тока мегаамперного диапазона. Как правило, такую задачу решают путем параллельной синхронной коммутации большого числа отдельных накопителей энергии на общую нагрузку. В качестве накопителей энергии обычно используются мощные конденсаторные батареи, а в качестве коммутаторов — искровые разрядники. Процесс срабатывания разрядников должен быть очень точно синхронизирован (с разбросом единицы наносекунд и менее), т.к. их неодновременное срабатывание вызывает снижение амплитуды и искажение формы импульса тока в нагрузке, а также может привести к аварийной ситуации в случае, когда через разрядник, сработавший первым, произойдет коммутация всех накопителей энергии. Среди искровых разрядников для параллельной работы наиболее целесообразно использовать тригатроны (Т.), отличающиеся простотой конструкции (по сравнению, например, с разрядниками с лазерным управлением) и наносекундной стабильностью  $\Delta t_3$  при напряжениях порядка 1 МВ [12]. Однако такими характеристиками обладают Т., управляющий электрод (У.Э.) которых размещен в заземленном основном электроде (О.Э.), а противоположный высоковольтный основной электрод (В.О.Э.) имеет отрицательный потенциал. Иногда по условиям проектирования У.Э. должен быть размещен в В.О.Э. [5].

Цель статьи — исследование возможности надежной параллельной работы Т. мегавольтного диапазона с разбросом времени запаздывания ме-

нее 1 нс, а также выработка требований к Т. на напряжение до 1 МВ с минимальными  $t_3$  и  $\Delta t_3$ .

**Схемы управления и особенности работы высоковольтного наносекундного тригатрона.** Авторами статьи предлагается тригатрон ( $P_M$ ), в котором, по их мнению, оптимальным образом выполнены условия для получения минимальных времен  $t_3$  и  $\Delta t_3$ . Работа  $P_M$  в составе двухмодульной секции генератора на 2 МА описана в [1,3], его конструкция приведена в [2]. Он представляет собой четырехканальный Т. на 400 кВ, в котором по условиям технического задания В.О.Э. имеет положительную полярность. Рабочей средой Т. служит  $SF_6$  под давлением до 1 МПа. У.Э. размещен в В.О.Э., а управляющий импульс (У.И.) имеет также положительную полярность. На рис. 1, а показана схема управления Т. в 12-ти модульном генераторе Фитча, где: М1—М12 — модули генератора;  $C_{ш} = 300$  пФ (120 кВ),  $C_v = 0,1$  мкФ,  $C = 0,6$  мкФ;  $R_{зар} = 164$  кОм,  $R_{нш} = 1$  кОм,  $R_p = 4$  кОм,  $R_{рм} = 300$ —1000 Ом (3—10 последовательно соединенных ТВО-60-100 Ом);  $C_{рм}$  — паразитная продольная емкость резисторов  $R_{рм}$ ,  $C_{рм} \approx 1 \div 10$  пФ;  $R_c$ ,  $R_n$  и  $R_B$  — согласующее сопротивление, сопротивления низковольтного и высоковольтного плечей резистивного делителя напряжения соответственно ( $R_c$  — ТВО-0,25-50 Ом,  $R_n$  — три параллельно соединенных ТВО-0,125-3 Ом,  $R_B$  — 20 шт. или 20 пар (2 в параллель) последовательно соединенных ТВО-5-470 Ом);  $\rho = 50$  Ом — волновое сопротивление коаксиального кабеля;  $z_n$  — импеданс индуктивной нагрузки модуля; ИТ — импульсный трансформатор на ферритовых кольцах ( $k_{тр} = 1 \div 2,5$ );  $L_k$ ,  $L_{др}$  — индуктивности У.Э. и разделительного дросселя со-

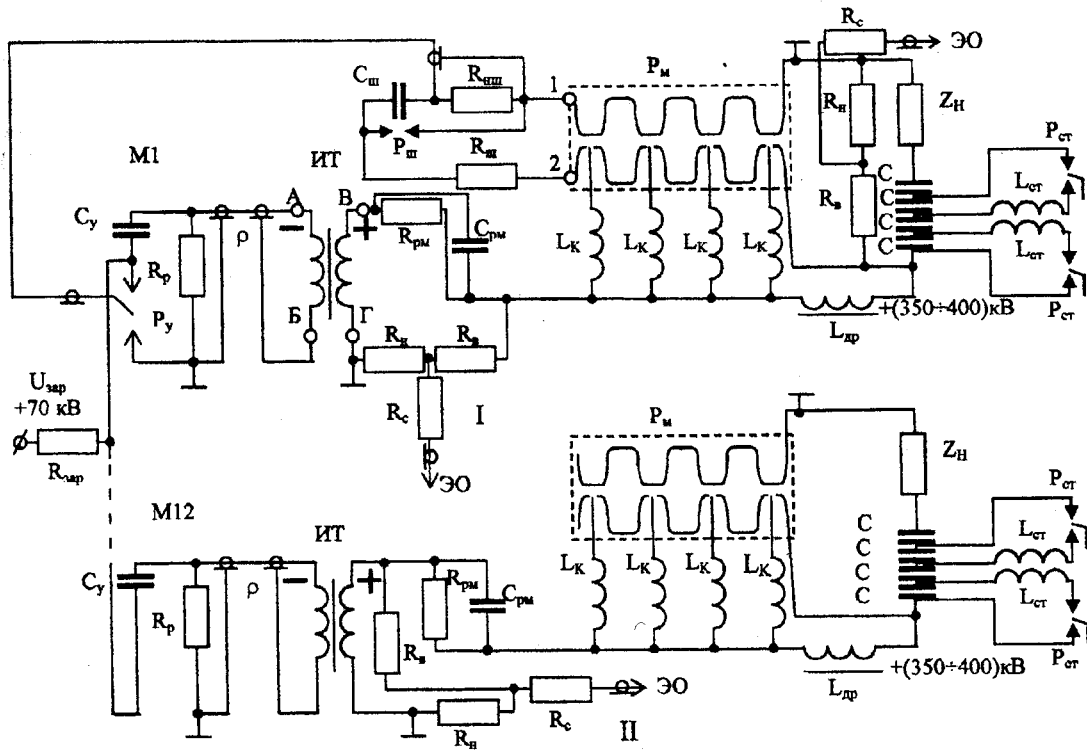


Рис. 1, а

ответственно; разрядники:  $P_y$  — вспомогательный,  $P_{ш}$  — шаровый,  $P_M$  — четырехканальный модули,  $P_{ст}$  — обеспечивающий переполюсовку емкости  $C$  ступени генератора Фитча;  $L_{ст}$  — индуктивность подключения  $P_{ст}$  в разрядном контуре ступени в генераторе Фитча; ЭО — электронный осциллограф.

На рис. 1, б показана схема замещения цепи управления  $R_M$  после прихода на ИТ У.И., где  $k$  — управляемый быстродействующий замыкающий ключ — тригatron цепи управления ( $P_y$  на рис. 1, а);  $C_{упр}$  — конструктивная емкость между У.Э. и охватывающим его В.О.Э.;  $C_{триг}$  — конструктивная емкость между высоковольтным и низковольтным О.Э.;  $C_{триг} \leq C_{упр}$ ;  $U_{имп}$  — импульсное напряжение У.И.; амплитуда  $U_{имп} \approx 70$  кВ;  $L_\mu$  — индуктивность намагничивания импульсного трансформатора ИТ;  $L_{s1}'$ ,  $C_y'$  — приведенные ко вторичной обмотке

ИТ индуктивность рассеивания первичной обмотки и приведенная емкость первичного накопителя в цепи управления соответственно;  $L_{s2}$  — индуктивность рассеивания вторичной обмотки ИТ;  $L_{рм}$  — индуктивность сопротивления  $R_{рм}$ ,  $L_{рм} \approx 1$  мкГн,  $L_{рм}$  следует учитывать при характерных временах изменений токов и напряжений  $\leq 10$  нс;  $L_{s1}'$ ,  $L_{s2} \ll L_{др}$ ,  $L_\mu \gg L_{др}$ ,  $\rho'$ ,  $R_p'$  — приведенные ко вторичной обмотке ИТ значения  $\rho$  и  $R_p$ . Остальные обозначения соответствуют обозначениям на рис. 1, а.

Тригatron  $P_M$  предназначен для коммутации накопительного модуля емкостью 0,15 мкФ в нагрузку  $Z_H$  индуктивностью 600 нГн. Накопительный модуль выполнен по схеме 4-х ступенчатого генератора Фитча с зарядом каждой емкости  $C$  ступени до 100 кВ. К высоковольтному выводу нако-

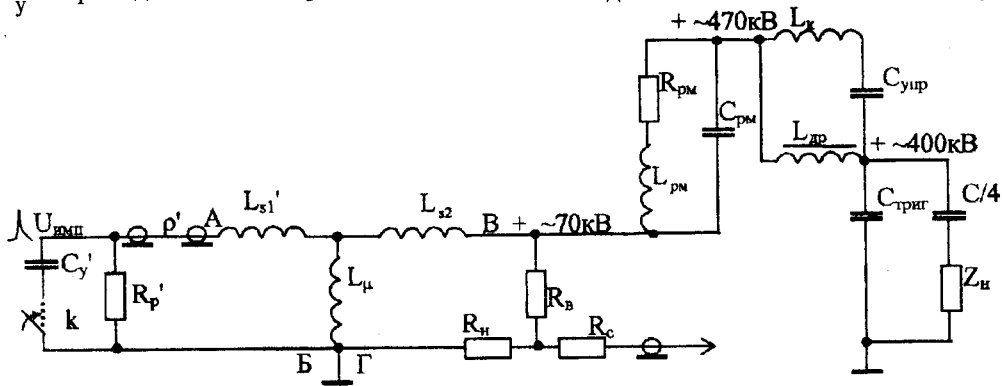


Рис. 1, б

питателя положительной полярности подключены В.О.Э. Р<sub>м</sub> непосредственно, а У.Э. — через разделительный дроссель L<sub>др</sub> (рис. 1,а). Т.о., за время сравнительно медленного ( $\approx 10$  мкс) зарядного процесса накопителя В.О.Э. и У.Э. имеют одинаковый потенциал, создавая в главном искровом промежутке (Г.И.П.) тригatronа близкое к однородному электрическое поле. Одновременно с накопителем модуля заряжается конденсатор C<sub>ш</sub>. При достижении на В.О.Э. Р<sub>м</sub> напряжения, близкого к пробивному U<sub>пр</sub>, срабатывает шаровый разрядник Р<sub>ш</sub>.

В [10] приводится описание экспериментов, в которых установлено, что с изменением напряжения на Г.И.П. Т. (с 8-ю тригatronными узлами) в диапазоне (0,8—1,0)U<sub>пр</sub> при неизменных давлении газа и длине промежутка активное сопротивление Т. практически не меняется как в одно-, так и в многоискровых режимах. Потери энергии в сопротивлении искры коммутатора составляют при этом  $\approx 10$  % энергии, запасенной в накопителе. При уменьшении напряжения вплоть до 0,6U<sub>пр</sub> активное сопротивление растет даже в многоискровом режиме, что обусловлено неравномерным распределением тока между каналами при больших недонапряжениях на коммутаторе. Аналогичные результаты получены для одноискрового пробоя в [13]. Т.о., режим работы Т. вблизи U<sub>пр</sub> на Г.И.П. Т. обеспечивает высокий КПД передачи энергии из накопителя в нагрузку, что обусловлено малыми потерями энергии в искровом канале Т. Это особенно важно для электротехнологических установок, работающих в частотном режиме.

После пробоя Р<sub>ш</sub> разряд C<sub>ш</sub> формирует на резисторе R<sub>нш</sub> импульс напряжения для запуска вспомогательного Р<sub>у</sub> в схеме управления Р<sub>м</sub>. После пробоя Р<sub>у</sub> и разряда вспомогательной емкости C<sub>у</sub> на резисторе R<sub>р</sub> формируется У.И., который подается на первичную обмотку импульсного трансформатора ИТ. В другом варианте управления к закороченным между собой точкам А и В подключается один вывод, а к закороченным между собой точкам Б и Г — второй вывод индуктивности, рассчитанной на полное зарядное напряжение накопителя, как и трансформатор ИТ. В последнем варианте управления изменяется полярность зарядного напряжения в схеме управления с тем, чтобы потенциальный вывод индуктивности имел положительную полярность и на У.Э. Р<sub>м</sub> поступал импульс положительной полярности. Последний, амплитудой  $\approx 70$  кВ и длительностью фронта  $\leq 40$  нс, суммируясь с положительным потенциалом амплитудой  $\approx 400$  кВ заряженной емкости C<sub>рм</sub>, включенной параллельно резистору R<sub>рм</sub> с учетом L<sub>рм</sub>, поступает на У.Э. Р<sub>м</sub>.

Напряжение на емкости C<sub>рм</sub> после переполюсовки соответствующих емкостей С генератора Фитча, но до прихода на импульсный трансформатор ИТ (рис. 1) У.И. имеет ту же величину, что и напряжение на результирующей емкости C/4 гене-

ратора Фитча,  $\approx 400$  кВ. После прихода У.И., согласно законам коммутации, емкость C<sub>рм</sub> не может разрядиться мгновенно. Поэтому импульсное напряжение У.И. арифметически складывается с напряжением на C<sub>рм</sub>. В результате потенциал У.И. Т. за единицы наносекунд увеличивается по сравнению с исходными  $\approx 400$  кВ на несколько десятков киловольт и может достичь  $\approx 470$  кВ, если У.И. достаточно крутой.

При этом следует учитывать основные постоянные времени:  $\tau_1$  — постоянная времени, по истечении которой падение напряжения на C<sub>упр</sub> превалирует над падением напряжения на L<sub>к</sub>.  $\tau_1 \approx (C_{упр} L_k)^{0,5}$ . При C<sub>упр</sub>  $\approx 2 \times 10^{-12}$  Ф; L<sub>к</sub>  $\approx 2 \times 10^{-8}$  Гн;  $\tau_1 \approx (2 \cdot 10^{-12} \times 2 \cdot 10^{-8})^{0,5} \approx 2 \cdot 10^{-10}$  с;  $\tau_2$  — постоянная времени, по истечении которой индуктивное сопротивление L<sub>др</sub> шунтирует емкостное сопротивление C<sub>упр</sub>.  $\tau_2 \approx (C_{упр} L_{др})^{0,5}$ . При L<sub>др</sub>  $\approx 4 \times 10^{-5}$  Гн ;  $\tau_2 \approx (2 \cdot 10^{-12} \times 4 \cdot 10^{-5})^{0,5} \approx 9 \cdot 10^{-9}$  с;  $\tau_3$  — постоянная времени, по истечении которой индуктивное сопротивление L<sub>др</sub> нельзя считать большим, чем емкостное сопротивление C<sub>рм</sub>.  $\tau_3 \approx (C_{рм} L_{др})^{0,5}$ . При C<sub>рм</sub>  $\approx 5 \cdot 10^{-12}$  Ф,  $\tau_3 \approx (5 \cdot 10^{-12} \times 4 \cdot 10^{-5})^{0,5} \approx 14 \cdot 10^{-9}$  с;  $\tau_4$  — постоянная времени разряда C<sub>рм</sub> через R<sub>рм</sub> и L<sub>рм</sub>, в нашем случае  $\tau_4 \approx 8$  нс.

Из оценок величин  $\tau_1 + \tau_4$  следует, что в течение нескольких (3 + 10) наносекунд потенциал У.Э. может на несколько десятков киловольт (до  $\approx 70$  кВ в нашем случае) превышать потенциал охватывающего его В.О.Э. ( $\approx 400$  кВ).

Из сравнения оценочных величин  $\tau_1 + \tau_4$  также следует, что характерное время нарастания У.И. должно составлять не более 10—15 нс, чтобы получить превышение на несколько десятков киловольт потенциала У.И. над потенциалом охватывающего его В.О.Э. и вызвать резкое искажение поля в Г.И.П. Указанное искажение поля может быть достигнуто и при большем времени нарастания У.И. ( $\leq 50$  нс). В этом случае следует увеличить емкость C<sub>рм</sub> до  $\approx (1 + 3) \cdot 10^{-11}$  Ф, выполнив ее в виде отдельного конструктивного элемента.

Наличие положительного импульсного потенциала  $\approx 470$  кВ на конце У.Э. обеспечивает, по нашему мнению, самые благоприятные условия для быстрого создания проводящего канала между О.Э. Т. из всех рассмотренных вариантов инициирования пробоя в Т. Так, согласно [4], распадающиеся под действием поля достаточной напряженности отрицательные ионы SF<sub>6</sub><sup>-</sup> служат источником начальных электронов. При напряжениях  $\approx U_{пр}$  эти ионы вблизи всей поверхности электрода и во всем объеме Г.И.П. станут "активными" как поставщики начальных электронов. При этом время статистического запаздывания станет чрезвычайно малым.

В Г.И.П. рассматриваемого Т. создаются более предпочтительные условия инициирования пробоя из-за того, что в отличие от [10], где положительный потенциал на У.Э. достигает величины только  $\approx 50$  кВ, торец с острыми кромками У.Э. в рассматриваемом Т. после прихода У.И. приобретает потенциал  $\approx 470$  кВ положительной полярности. Поэтому в рассматриваемом Т. на острых кромках торца У.Э. напряженность электрического поля в системе "положительный стержень—плоскость" значительно выше, чем в [10], соответственно в ней меньше время  $t_3$  и меньшее время развития и формирования разряда.

Важно было обеспечить параллельную работу Т. с разбросом времени срабатывания  $\Delta t_3 \leq 1$  нс. Исследования проводились для двух четырехканальных  $P_M$  в составе двухмодульной секции генератора, т.е. для 8 отдельных Т., включенных параллельно. Совместно с измерением импульсов напряжения в процессе коммутации Т. проводилось фиксирование фактов срабатывания отдельных Т. Для этого на боковых поверхностях прозрачных оргстеклянных корпусов  $P_M$  размещались световые датчики, каждый из которых регистрировал излучение только при срабатывании "своего" Т. (и не фиксировал излучение от других разрядников —  $P_{ст}$  и  $P_y$ ). Сигналы (по световым вспышкам) о срабатывании отдельных Т. фиксировались на экране 4-канального осциллографа (для 4-х отдельных Т. в составе одного  $P_M$  или для двух разных  $P_M$  секций).

Конструктивно в  $P_M$  тригatronные узлы размещены таким образом, что время прохождения электромагнитной волны между соседними узлами составляет  $\approx 0,7$  нс (расстояние между узлами  $\approx 200$  мм). Это означает, что после окончания коммутации в Т., сработавшем первым, информация о том, что этот Т. уже замкнут, дойдет до соседнего Т. через 0,7 нс, и если за это время в этом соседнем Т. не окончатся коммутация, то он уже полноценно не сработает. Также по световым вспышкам наблюдалась параллельная работа Т., время пробега электромагнитной волны между которыми составляло 0,7 нс, что является доказательством соблюдения неравенства  $\Delta t_3 < 1$  нс. А  $\Delta t_3 < 1$  невозможно лишь при  $t_3$ , не слишком превышающих 1 нс.

#### Устройство тригatronа с защитным экраном.

На рис. 2 показана конструкция электродной системы одного канала Т., где: 1 — цилиндрический составной стальной защитный экран; 2 — основной электрод с У.Э.; 3 — противостоящий О.Э. (электроды 2 и 3 в сборе можно менять местами); 4 — У.Э., выступающий вглубь Г.И.П. на 0,1—0,5 мм; 5 — составное градиентное кольцо; 6 — стальные фланцы О.Э.; 7, 8 — верхняя и нижняя половины корпуса Т. соответственно.

Обстоятельством, благоприятствующим ускорению развития и формирования разряда в Г.И.П. рассматриваемого Т., является наличие защитного

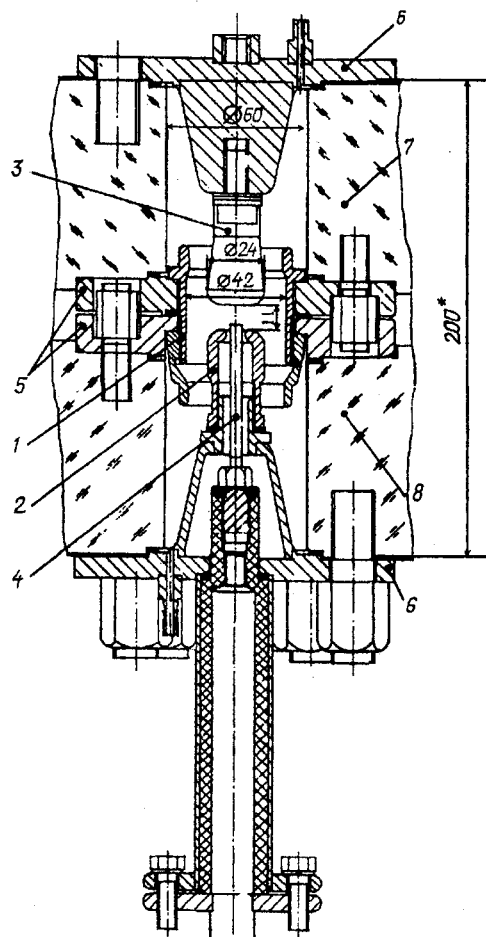


Рис. 2

экрана 1 в виде металлического кольца в его разрядной камере. Из [12] известно секционирование диэлектрического корпуса разрядника градиентными металлическими кольцами для улучшения распределения напряжения по изолятору при импульсной зарядке. Аналогичную функцию выполняют экран 1 со своими стальными фланцами 5 и фланцы 6 О.Э. Кроме того, экран 1, находясь непосредственно в разрядной камере вблизи О.Э. и имея при этом потенциал, равный половине потенциала О.Э., способствует созданию близкого к однородному электрического поля в пространстве между О.Э. Второе (и, возможно, главное) предназначение экрана 1 заключается в защите внутренней поверхности изоляции разрядной камеры от излучения искрового канала, его ударной волны и продуктов эрозии электродов, поскольку торцы экрана, по меньшей мере, на 15 мм выступают за рабочие торцы О.Э. Защиту от указанных негативных факторов в Т. можно обеспечить конструктивно. Например, в [9] описан Т. на 150 кВ, в котором формы противостоящих друг другу поверхностей О.Э. (не только в зоне разряда) повторяют друг друга. В такой конструкции ударная волна из канала разряда многократно отражается от стенок О.Э., что снижает динамические воздействия на изоляцию, а термические воздействия практически устраняются. Однако изготовление таких пар О.Э. является

задачей материало- и трудозатратной, особенно для разрядников с напряжением выше 400—500 кВ. В другой конструкции Т. [6] для защиты от тех же негативных факторов искрового разряда часть заземленного О.Э. в виде металлического кольца охватывает зону разряда, как и в описываемом Т. Однако, в отличие от последнего, в [6] нарушается симметрия расположения эквипотенциальных поверхностей относительно плоскости, проходящей через центр Г.И.П. перпендикулярно общей оси О.Э., что не обеспечивает создания в разрядном промежутке однородного электрического поля до прихода У.И.

В описываемом Т. присутствуют все условия, благоприятствующие сокращению времен  $t_3$  и  $\Delta t_3$ , за исключением внешней подсветки Г.И.П. коротковолновым излучением для уменьшения статистического времени запаздывания. Однако, на наш взгляд, этот недостаток может быть скомпенсирован наличием источника эффективных электронов в виде импульсной короны с острых кромок торца У.Э. О ее наличии может свидетельствовать тот факт, что оптическим датчиком, укрепленным на внешней боковой поверхности оргстеклянного корпуса Т., свечение в Г.И.П. зафиксировано с самого начала роста амплитуды У.И. еще до начала коммутации в Г.И.П. и поджигающем зазоре.

Четыре параллельно включенных Т. (четырёхканальный Т.), один из которых показан на рис. 2, конструктивно объединены в одном корпусе так, что их оси симметрии проходят через вершины квадрата со стороной 200 мм. Стержневой У.Э. диаметром 5 мм выступает внутрь Г.И.П. на 0,2 мм, а кольцевой зазор в тригatronном узле составляет 1,5 мм.

**Экспериментальные результаты.** Эксперименты по достижению минимальных  $t_3$  и  $\Delta t_3$  для двух  $R_M$  в секции из двух модулей, собранных по схеме генератора Фитча, показали следующее. Амплитуда тока через один канал в 4-х канальных Т. достигала 280 кА на короткозамкнутую нагрузку, при 4-х канальной работе ток отдельного канала равнялся  $\approx 167$  кА при индуктивной нагрузке 50 нГн. При рабочих напряжениях между О.Э. 350—400 кВ и расстояниях между ними 10—12 мм удалось добиться синхронного срабатывания Т. с временами  $t_3 \approx 1$  нс,  $\Delta t_3 < 1$  нс, времен коммутации  $t_K \approx 1$  нс и разброса времени коммутации  $\Delta t_K \leq 1$  нс в 95 % из всех срабатываний в этом режиме. Объяснение этому мы видим в том, что область первоначальной ионизации в момент искажения поля У.И. занимает весь Г.И.П. Эту область можно рассматривать как зону ионизации импульсного коронного разряда, переходящую в диффузный объемный пробой между У.Э. и противостоящим О.Э., а затем в искровой разряд или сразу в искровой разряд. Если принять во внимание, что скорость распространения стримеров при напряжениях, близких к  $U_{пр}$ , равна  $\approx 10$  мм/нс [8, 9, 14], то при рас-

стояниях  $\approx 12$  мм между О.Э. время формирования и развития стримера примерно соответствует времени, полученному в наших экспериментах  $\approx 1$  нс. Более того, суммарное  $t_3$  пробоя, включающее в себя и статистическое, в наших экспериментах по управлению Т. через У.Э., встроенный в В.О.Э. положительной полярности, не превышало 1 нс. Однако, с увеличением расстояния между О.Э. свыше 12 мм (при сохранении условий работы Т. вблизи  $U_{пр}$ ) наблюдалось резкое увеличение времен задержки  $t_3$ , коммутации  $t_K$  и их разброса  $\Delta t_3$  и  $\Delta t_K$ . Вероятно, в этих условиях зона эффективного искажения поля и вызванная этим искажением первоначальная ионизация от У.Э. не распространяются на весь Г.И.П., и требуется дополнительное время для прорастания стримеров от границы зоны первоначальной ионизации до противоположного О.Э. Были проведены эксперименты, в которых в исследуемом тригatronе У.Э. размещался в заземленном О.Э., а В.О.Э. также имел положительный потенциал. Параметры У.И. не изменялись за исключением полярности — она была отрицательной. Не изменялись и остальные условия эксперимента. Примерно в 20 % случаев удавалось достичь времен  $t_3 \approx 1$  нс,  $\Delta t_3 \approx 1$  нс, в остальных же случаях наблюдалось резкое увеличение времен  $t_3$ , а разброс  $\Delta t_3$  изменялся в пределах от 20 до 80 нс. Поэтому было принято решение о размещении У.Э. в В.О.Э. положительной полярности.

Следует отметить и недостаток предлагаемого Т. с положительным высоковольтным О.Э. Известно (например, [7]), что в элегазе  $U_{пр}$  ниже при положительной полярности высоковольтного О.Э., чем при отрицательной. Следовательно, при прочих равных условиях в предлагаемом Т. приходится несколько увеличивать длину Г.И.П. или давление газа по сравнению с Т., у которого В.О.Э. находится под отрицательным потенциалом.

**Требования, выполнение которых обеспечивает наносекундное срабатывание высоковольтных тригatronов с ресурсом  $10^9$  импульсов и более.**

Таким образом, Т. с рабочим напряжением до 1 МВ, способные надежно работать в параллель и обладающие  $t_3 \approx 1$  нс,  $\Delta t_3 \leq 1$  нс, должны удовлетворять следующим требованиям.

1. Рабочее напряжение  $U_0$  между О.Э. должно находиться в диапазоне  $0,85U_{сп} \leq U_0 \leq 0,95U_{сп}$ , где  $U_{сп}$  — напряжение самопробоя.

2. Время нарастания У.И. должно быть  $\leq 50$  нс.

3. При достижении между У.Э. и противостоящим ему О.Э. пробивного напряжения, после прихода У.И., светящаяся зона первоначальной объемной ионизации должна занимать весь разрядный промежуток (между У.Э. и противостоящим ему О.Э.). При этом минимальные  $t_3$  и  $\Delta t_3$  получаются, когда У.Э. имеет положительную полярность как относительно противостоящего ему, так и относительно охватывающего его О.Э. Последнее может

иметь место как в случае, когда У.Э. встроены в низковольтный О.Э. (тогда противостоящий О.Э. находится под высоким потенциалом отрицательной полярности), так и в случае, когда У.Э. встроены в высоковольтный электрод положительной полярности.

4. Расстояние между О.Э. (Г.И.П.) не должно превышать 12 мм.

5. У.Э. должен иметь форму цилиндра (диаметром не более 7 мм), кромка торца которого, обращенная к противостоящему О.Э., должна иметь радиус закругления не более 0,1 мм. У.Э. должен выступать вглубь Г.И.П. на 0,1–0,5 мм.

6. Отношение величины  $D$  Г.И.П. к величине промежутка  $d$  между У.Э. и прилегающим к нему О.Э. должно находиться в диапазоне 5–7, а  $d$  — удовлетворять неравенству  $d \leq 2,5$  мм.

7. Для обеспечения ресурса  $10^9$  импульсов и более Т. должен содержать в разрядной камере защитный металлический экран, находящийся примерно под половинным потенциалом относительно В.О.Э.

8. Т. должен быть заполнен электрически высокопрочным газом или смесью газов под избыточным давлением.

9. Электроды Т. должны быть выполнены из стойких к эрозии проводящих материалов, эрозия которых происходит равномерно и медленно.

10. Отношение оптимальной амплитуды У.И.  $U_{\text{упр}}$  к амплитуде напряжения  $U_0$  между О.Э. уменьшается с увеличением  $U_0$  и при  $300 \text{ кВ} \leq U_0 \leq 1000 \text{ кВ}$  составляет 0,1–0,3  $U_0$ .

11. Расстояние между соседними тригatronами при их параллельной работе должно превышать величину  $S = kv(\Delta t_3 + \Delta t_k)$ , где  $k > 1$  — безразмерный коэффициент запаса;  $v$  — скорость распространения электромагнитной волны в среде между Т.

**Выводы.** 1. При 4-х канальной коммутации токов  $\approx 170$  кА на индуктивную нагрузку в исследованных Т. на 400 кВ достигнут стабильный разброс времени  $\Delta t_3 \leq 1$  нс, что позволяет использовать данные Т. для параллельной работы в многомодульных ГИТ с коммутируемыми токами в несколько мегаампер.

2. В исследованной конструкции Т. на 400 кВ при давлении элегаза в Г.И.П. 1 МПа экспериментально определено максимальное расстояние между О.Э., равное 12 мм, при котором разброс времени  $\Delta t_3 \leq 1$  нс.

3. Потери в искровом канале Т. не превышают 10 % энергии, запасенной в накопителе, при работе Т. вблизи  $U_{\text{пр}}$ . Это позволяет создавать электроустановки с пиковой мощностью порядка 1 ТВт при КПД около 90 %.

4. Отличительной особенностью исследованных Т. является расположение узла управления в В.О.Э. положительной полярности, причем полярность У.И. была также положительной, а величина

потенциала на У.Э. превышала потенциал на В.О.Э. на 70 кВ. Кроме того, в исследованных Т. использовался защитный металлический экран, находящийся под половинным потенциалом относительно В.О.Э.

1. Бойко Н.И., Борцов А.В., Евдошенко Л.С. и др. Низкоиндуктивная секция генератора мощных высоковольтных импульсов по схеме Фитча // Приборы и техника эксперимента. — 2005. — № 4. — С. 57–65.

2. Бойко Н.И., Евдошенко Л.С., Зароченцев А.И., Иванов В.М. Четырехканальный высоковольтный искровой разрядник // Электротехника и электромеханика. — 2006. — № 3. — С. 80–81.

3. Бойко Н.И., Евдошенко Л.С., Иванов В.М. и др. Тригatronны на 400 кВ для мощных низкоиндуктивных генераторов импульсов // Приборы и техника эксперимента. — 2008. — № 1. — С. 78–86.

4. Бортник И.М. Физические свойства и электрическая прочность элегаза. — М: Энергоатомиздат, 1988. — 80 с.

5. Валеев Р.И., Давыдов О.В., Никифоров М.Г. и др. Многоканальный мегавольтный коммутатор с поджигом на высоком потенциале. / "Высоковольтные искровые и взрывные коммутаторы". Тез. докл. совместного заседания секций научных советов АН СССР "Научные основы электрофизики и электроэнергетики" и "Проблемы мощной импульсной энергетики". — Томск, 1986. — С. 77–78.

6. Герасимов А.И. Многоканальные разрядники с ламельными управляющими электродами, их развитие и применение // Приборы и техника эксперимента. — 2004. — № 1. — С. 5–38.

7. Герасимов А.И., Кулешов Г.Д., Павловский А.И. и др. Пусковые характеристики наполненного SF<sub>6</sub> тригatronа на 100 кВ // Приборы и техника эксперимента. — 1975. — № 5. — С. 111–113.

8. Дашук П.Н., Зайнец С.Л., Комельков В.С. и др. Техника больших импульсных токов и магнитных полей / Под ред. В.С. Комелькова. — М.: Атомиздат, 1970. — 472 с.

9. Ельчанинов А.С., Емельянов В.Г., Ковальчук Б.М. и др. Многоискровая работа мегавольтного тригatronа // Приборы и техника эксперимента. — 1974. — № 2. — С. 103–105.

10. Емельянов В.Г., Ковальчук Б.М., Лавринович В.А. и др. Многоискровой высоковольтный тригatron // Приборы и техника эксперимента. — 1975. — № 4. — С. 89–92.

11. Месля Г.А. Импульсная энергетика и электроника. — М: Наука, 2004. — 704 с.

12. Накопление и коммутация энергии больших плотностей / Под ред. У.Бостика, В.Нарди, О.Цукера. Пер. с англ. под ред. Э.И. Асиновского и В.С. Комелькова. — М.: Мир, 1979. — 476 с.

13. Попов П.Г., Шкуронат П.И. Тезисы докладов IV Всесоюзной конференции по газоразрядным приборам. — ЦНИИ "Электроника": 1974. — Серия 4. — вып. 2 (26), 39.

14. Buttram M.T., Sampayan S. Repetitive Spark Gap Switches // Gas Discharge Closing Switches/ Ed. by G. Schaefer, M. Kristiansen, and A. Guenther—N.-Y.: Plenum press, 1990. P. 63–85.

Надійшла 12.02.2008