

РАЗВИТИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О МЕХАНИЗМАХ СРАБАТЫВАНИЯ ТРИГАТРОНОВ И ИХ РАЦИОНАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ (ОБЗОР)

У статті за результатами аналізу літературних джерел показано розвиток уявлень щодо механізмів пробоя тригатронів, особливу увагу приділено часу запізнення t , пробоя тригатрону та його розкиду Δt .

В статті по результатах аналізу літературних джерел показано розвиток представлень о механізмах пробоя тригатронів, особе внимание уделено времени t , запаздывания пробоя тригатронів и его разбросу Δt .

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Тригatronные искровые разрядники в ряду высоковольтных коммутаторов занимают особое место благодаря присущим им достоинствам:

1. Широкий диапазон рабочих напряжений (от нескольких киловольт до нескольких мегавольт) и коммутируемых токов (от десятков ампер до единиц мегаампер).

2. Диапазон устойчивого управления – от 0,3 до 1,0 напряжения самопробоя $U_{сп}$.

3. Возможность получения субнаносекундного разброса времени Δt , срабатывания вплоть до напряжений порядка нескольких мегавольт, что позволяет использовать тригatronы при параллельной работе.

4. Технологичная, простая и удобная конструкция – управляющий электрод (УЭ) расположен в отверстии, выполненном в одном из основных электродов (ОЭ).

Из-за простоты устройства и перечисленных характеристик надежной работы тригatronы нашли широкое применение не только в экспериментальной технике, но и в технологических электроустановках, область использования которых все больше расширяется. Знание механизма инициирования пробоя тригatronов поможет разработчикам оптимальным образом выбрать конструкцию и получить требуемые характеристики тригatronа. Это, в свою очередь, позволит создать перспективные генераторы высоковольтных импульсов, необходимые для модернизации существующих электротехнологий и для разработки новых.

На рис. 1 приведено схематическое изображение тригatronа, где: 1, 2 – ОЭ; 3 – УЭ; 4 – изолирующая втулка (необязательный элемент тригatronа). Тригatron в управляемом режиме срабатывает в том случае, если приложенный к стержневому электроду 3 управляющий высоковольтный импульс напряжения $U_{упр}$ вызывает пробой поджигающего промежутка d и инициирует пробой основного промежутка D , к которому предварительно приложено напряжение U_0 , меньшее, чем напряжение самопробоя тригatronа $U_{сп}$. Устройство тригatronа впервые было предложено Л.И. Ивановым и И.С. Стекольниковым [1]. Детальное изучение процессов, происходящих в тригatronе, показывает, что подсветка от поджигающего промежутка во многих случаях имеет лишь вспомогательное значение, разряд же инициируется в основном другими факторами.

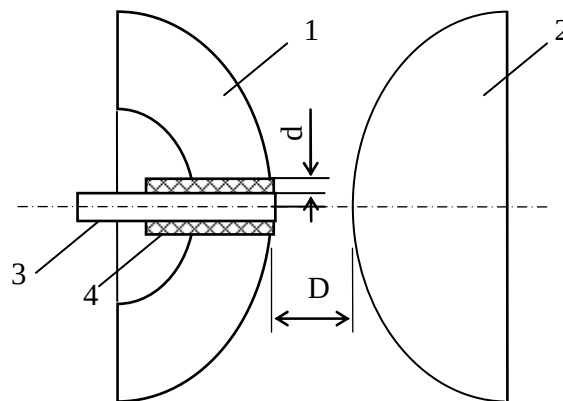


Рис. 1

ЦЕЛЬ СТАТЬИ

На основе анализа существующих конструкций тригatronов, процессов, происходящих в них, и их характеристик обосновать выбор оптимальной конструкции и выработать требования к тригatronам, параллельная работа которых может обеспечить коммутацию мощностей порядка 1 ТВт и более.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

Характеристики тригatronов зависят от:

- величины и полярности напряжения между ОЭ – главного искрового промежутка (ГИП);
- амплитуды, полярности и формы управляющего импульса напряжения;
- конструкции: формы и геометрических размеров ОЭ и УЭ, длины поджигающего и основного разрядных промежутков;
- расположения УЭ в низковольтном или высоковольтном ОЭ;
- параметров разрядного контура.

Сначала рассмотрим работу тригatronа в воздухе при атмосферном давлении. Существуют три точки зрения на механизм инициирования разряда в тригatronах. В публикациях о первой из них, например, [2] в 1962 г. автор склоняется к мнению, что возбуждение разряда в ГИП происходит в результате фотоионизации в объеме, вызванной коротковолновым излучением от искры поджигающего разряда. Считается, что возникшие фотоэлектроны вызывают образование электронных лавин, преобразующихся в дальнейшем в пробивные стримеры.

В публикациях [3] 1957 г. и [4] 1962 г. рассматривается второй механизм инициирования разряда в

тригатроне. В соответствии с ним разряд возбуждается вследствие роста ударной ионизации в области пониженной плотности, возникающей при протекании тока поджига. Более мощному поджигу соответствуют больший диапазон рабочих напряжений тригатрона и меньшие времена запаздывания t_3 срабатывания.

Однако указанные представления не в состоянии удовлетворительно объяснить некоторые характеристики тригатрона. В первом механизме неясно за счет чего развиваются эффективные с точки зрения формирования разряда электронные лавины, когда напряженность электрического поля в ГИП ниже статической пробивной. Пришлось бы допустить, что поджигающий разряд обеспечил путем фотоионизации концентрацию положительных ионов, соизмеримую с критической, которая необходима для формирования стримера, что маловероятно. Процесс возникновения области малой плотности газа, будучи по своей природе сравнительно инерционным, не может объяснить происхождение малых t_3 в тригатроне – доли микросекунды. Кроме того, оба механизма не в состоянии объяснить и такое известное и важное свойство тригатрона, как влияние полярности основного напряжения и управляющего импульса на время t_3 срабатывания.

Одной из предпосылок для гипотезы относительно третьего механизма инициирования послужил экспериментально установленный в исследовании [5] факт возможного инициирования разряда в тригатроне до момента пробоя поджигающего промежутка.

Шкурпат П.И. [5] первым дал объяснение третьего механизма инициирования пробоя тригатрона в 1960 г. Вкратце его можно изложить так [6, С. 196]. Если к ГИП тригатрона приложено напряжение U_0 ниже статического разрядного $U_{ст}$, то напряженность электрического поля у ОЭ и УЭ ниже критической E_k ($60 \div 70$ кВ/см). В этих условиях в ГИП не могут развиваться самоподдерживающиеся ионизационные процессы. В момент приложения к УЭ высоковольтного управляющего импульса $U_{упр}$ в непосредственной близости от этого электрода происходит резкое изменение электрического поля.

Величина и характер этого изменения определяются величиной и полярностью управляющего импульса относительно основного напряжения, а также геометрией поджигающего промежутка. Если изменение электрического поля приводит к усилению его напряженности свыше E_k , хотя бы в небольшой части разрядного промежутка, то могут возникнуть ионизационные процессы, приводящие к пробоя ГИП.

Кроме резкого усиления напряженности электрического поля у кончика УЭ одновременно возрастает разность потенциалов между УЭ и ОЭ. Из-за возрастания напряженности поля возле УЭ возникает самоподдерживающийся ионизационный процесс, обеспечивающий развитие разряда к противостоящему ОЭ. В момент замыкания указанных электродов предразрядным каналом, поскольку УЭ отделен от генератора управляющих импульсов конечным импедансом, УЭ (если он встроен в низковольтный ОЭ) приобретает высокий потенциал. Поэтому одновременно с пробоем промежутка 2 – 3 (см. рис. 1) происходит пробой поджигающего промежутка d (1 – 3), и

ток контура замыкается между ОЭ.

Автором [5] экспериментально было показано, что ток в ГИП возникает одновременно с пробоем поджигающего промежутка. Это означает, что инициирование разряда в ГИП не вызвано пробоем поджигающего промежутка.

В случае опережающего пробоя [7, С. 35] промежутка между УЭ и противоположным ОЭ начальная стадия разряда формируется в системе "стержень (УЭ) – плоскость (ОЭ)". В такой системе наименьшее пробивное напряжение и соответственно наименьшее время t_3 соответствует положительной полярности стержня. Именно при положительной полярности стержневого УЭ и отрицательной полярности противоположного ОЭ получено наименьшее, согласно [7], время t_3 тригатрона, что говорит в пользу "потенциального", а не "искрового" механизма инициирования пробоя тригатрона.

В [8, 9] установлено, что время t_3 оказывается минимальным в том случае, когда пробой обоих промежутков происходит практически одновременно, лишь с небольшим опережением пробоя в ГИП.

ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРИГАТРОНА

Разброс времени Δt_3 запаздывания срабатывания является важной характеристикой тригатрона. Минимальная величина Δt_3 позволяет использовать тригатроны для параллельного включения нескольких накопителей с целью достижения на нагрузке больших амплитуд токов – порядка десятков мегаампер.

Проанализируем обстоятельства и факторы, влияющие на достижение минимального Δt_3 в тригатроне. Очевидно, минимальное Δt_3 достигается при минимальном t_3 , а минимальный разброс времени коммутации Δt_k – при минимальном t_k . Время срабатывания t_c тригатрона как и любого другого управляемого разрядника, складывается из времени t_3 запаздывания и времени коммутации t_k : $t_c = t_3 + t_k$.

Как известно [6, С. 177], время t_3 запаздывания срабатывания состоит из статистического времени $t_{ст}$ запаздывания и времени развития и формирования $t_{рф}$ предразрядного канала.

Время $t_{ст}$ (интервал времени от момента достижения статического разрядного напряжения до появления начального электрона, способного вызвать самоподдерживающийся разряд) определяется величиной напряженности электрического поля, геометрией разрядного промежутка и степенью предварительной ионизации или облучения промежутка.

Для минимизации $t_{ст}$ следует в ГИП выбирать напряженность электрического поля E , близкую к пробивной, что увеличивает вероятность появления эффективных электронов. Однако при наличии сильного постоянного электрического поля между ОЭ [6, С. 207] концентрация отрицательных ионов (способных быть источником электронов вследствие их отрыва) в ГИП оказывается недостаточной, и процесс начинается при E , существенно превосходящей E_k . Поэтому обычно в воздушных разрядниках (использование воздушной изоляции удешевляет электротехнологические установки) в ГИП выбирают градиент ~ 20 кВ/см, чтобы уменьшить вероятность самопроиз-

вольного срабатывания, что крайне важно при параллельной работе многих разрядников. При самопроизвольном срабатывании одного из разрядников в этом случае вся энергия, запасенная в накопителях, коммутируется через него в нагрузку. Это снижает амплитуду тока в нагрузке, увеличивает индуктивность разрядного контура и может привести к выходу из строя самого разрядника.

Появлению свободных электронов [6, С. 207] в ГИП и уменьшению $t_{ст}$ способствует его подсветка коротковолновым излучением, способным вызвать фотоионизацию в объеме (длина волны излучения для воздуха $79 \div 145$ нм) и фотоэлектронную эмиссию с поверхности катода ($260 \div 300$ нм). Причем, чем интенсивнее облучение, тем меньше $t_{ст}$.

Источником свободных электронов в тригatronах, по-видимому, может служить импульсная корона. Управляющий высоковольтный импульс создает на кромке УЭ высоконапряженное резко неоднородное электрическое поле. Когда амплитуда управляющего импульса достигает потенциала зажигания, на кромке УЭ возникает импульсная корона. Чем меньше радиус скругления кромки УЭ, тем меньше напряжение зажигания короны. Следовательно, чем быстрее нарастает импульс управляющего напряжения и чем острее кромка УЭ, тем меньше время понадобится для рождения первого эффективного электрона в зоне максимальной напряженности поля с кромки УЭ.

В [6, С. 204] описываются начальные явления процесса срабатывания тригatronа. В работе была проведена регистрация предразрядных токов и начальных стадий свечения в разрядном промежутке тригatronа с помощью фотоэлектронных умножителей. Было установлено, что ионизационный процесс у кончика УЭ начинается раньше, чем достигнуто максимальное значение напряжения управляющего импульса. Этот процесс характеризуется быстрым нарастанием предразрядного тока, достигающим десятков ампер, и появлением свечения, которое распространяется от кончика стержня к противоположному ОЭ. Скорость распространения свечения изменялась от 1 мм/нс до 10 мм/нс в зависимости от величины напряжения ГИП – при изменении его от минимального напряжения срабатывания $U_{мин}$ до статического разрядного напряжения $U_{пр}$. Полученная при этом фотография показывает, что развитие разряда в ГИП начинается до пробоя поджигающего промежутка. При этом ГИП заполняется светящимися нитями, направленными по силовым линиям электрического поля. Хотя большинство нитей достигает противоположного электрода, они еще не обладают достаточной проводимостью, чтобы замкнуть промежуток. По своим свойствам они аналогичны стримерам, рождающимся перед головкой лидера в длинных искровых промежутках, получившим название импульсной короны. Поскольку эффективными для образования лавины могут быть фотоэлектроны, возникновение которых возможно в любой точке ГИП, то и стримеры могут развиваться в любой точке разрядного промежутка. При этом направление развития стримеров может быть как в сторону одного, так и в сторону другого ОЭ. Несколько стримеров могут возникнуть

одновременно в разных точках промежутка. Вследствие "ветвистой" природы стримеров (их направления могут отклоняться на $30^\circ \div 40^\circ$ от направления силовых линий поля) они перекрывают друг друга, образуя разрядный канал между ОЭ – лидер. При напряжениях, близких к $U_{пр}$, происходит бурный рост проводимости нитей (стримеров) за счет ударной ионизации, вызванной сильными электрическими полями, и ступенчатой ионизации, что приводит к быстрому формированию разрядного канала в одном из стримеров или в отдельных участках стримеров в случае их пересечения. Дальнейшее развитие разряда в промежутке происходит аналогично пробую в сильно неоднородном поле в результате формирования хорошо проводящего канала лидера.

Очевидно, что чем выше начальная напряженность поля (близкая к разрядной) в ГИП, тем интенсивнее происходят описываемые процессы. Следовательно, выбирая начальную напряженность электрического поля в ГИП, близкую к пробивной, можно уменьшить время развития и формирования разряда, т.е. уменьшить время t_3 и его разброс. Если же напряжение в ГИП существенно ниже $U_{пр}$, то проводимость в нитях импульсной короны может уменьшаться во времени в результате того, что процесс прилипания электронов к молекулам кислорода воздуха начинает преобладать над процессами ионизации, что приводит к увеличению t_3 .

Для обеспечения предельно малых времен t_3 и Δt_3 в [6, С. 215] рекомендуется использовать тригatronы, у которых длина поджигающего промежутка несколько меньше длины ГИП. При этом управляющий импульс должен иметь амплитуду, примерно равную рабочему напряжению со временем нарастания около 10 нс. Наилучшие достигнутые результаты при давлениях, близких к атмосферному, в воздухе и некоторых других газах составляют $t_3 \sim 20$ нс, $\Delta t_3 \sim 5$ нс, что, вероятно, объясняется пониженной рабочей напряженностью в ГИП. Повысить рабочую напряженность можно увеличением давления газа в разрядной камере тригatronа.

В экспериментах [8, 10] в условиях, существенно отличных от рекомендуемых П.И. Шкуропатом, реализуется "потенциальный" механизм инициирования разряда в ГИП до пробоя поджигающего промежутка, причем достигаются также малые времена t_3 и Δt_3 . В этих экспериментах длина поджигающего промежутка не превышала 10 – 15% длины ГИП. Кроме того, минимальные времена $t_3 \sim 5$ нс при минимальном $\Delta t_3 \sim 0,5$ нс были получены при амплитуде управляющего импульса не более 10 – 15% от величины основного напряжения. Анализ приведенных экспериментальных зависимостей показывает, что для обеспечения наименьших t_3 необходимо, чтобы после прихода управляющего импульса перекрытие основного промежутка происходило быстрее, чем пробьется поджигающий зазор. Для выполнения этого условия в [7, С. 35] рекомендуется правильно соотносить D и поджигающего d промежутков и выбирать оптимальную амплитуду управляющего импульса $U_{упр}$. При слишком больших $U_{упр}$ первым пробивается поджигающий зазор, пусковой

потенциал шунтируется малым импедансом искры в этом зазоре, становится равным потенциалу прилегающего ОЭ, и t_3 увеличивается. При малых $U_{\text{упр}}$ градиент электрического поля у кромки УЭ уменьшается, и t_3 также возрастает. Рекомендуется выполнять соотношение $D/d = 5 \div 10$, т.к. при меньших D/d уменьшается перенапряжение в зазоре d при перекрытии промежутка D , а при больших D/d необходимо существенно уменьшать $U_{\text{упр}}$.

Согласно [10] время t_3 зависит от величины сопротивления в цепи управления. С увеличением сопротивления растут t_3 и Δt_3 . Также показано, что вольт – секундные характеристики (зависимости времени t_3 от амплитуды основного напряжения) тригatronа зависят от соотношения полярностей основного и пускового напряжений. В азоте или в его смеси с элегазом наименьшее время t_3 получено при отрицательной полярности основного напряжения и положительной полярности управляющего импульса. Эти выводы подтверждаются и другими авторами [6]. Замечено, что зависимость времени t_3 от амплитуды управляющего импульса $U_{\text{упр}}$ имеет минимум, т.е. для получения минимального t_3 требуется оптимальное по амплитуде $U_{\text{упр}}$. При амплитуде $U_{\text{упр}}$ больше или меньше оптимального время t_3 увеличивается.

В экспериментах [7, С. 32] выявлено, что вольт – секундные характеристики тригatronа практически не отличаются как при работе с диэлектрической втулкой, так и без нее. Поэтому в практических конструкциях использовались тригatronы без втулки.

В высоковольтных импульсных источниках питания на основе полосковых формирующих линий или малоиндуктивных конденсаторов с плоской ошиновкой в качестве коммутаторов целесообразно использовать искровые разрядники рельсового типа. В неуправляемых рельсовых разрядниках многоканальная коммутация может быть достигнута при скоростях нарастания напряжения на ГИП $dU/dt \geq 10^{12}$ В/с в условиях резко неоднородного электрического поля. При малых значениях dU/dt зажигание нескольких разрядных каналов возможно только при управляемом инициировании пробоя. В [11] приводятся результаты испытания газонаполненного (с рабочим давлением до 1 МПа) рельсового разрядника тригatronного типа с локальными узлами поджига. Разрядник рассчитан на коммутацию энергии до 3 кДж при напряжении до 50 кВ. В низковольтном плоском электроде разрядника длиной 50 и шириной 5 см в отверстиях $\varnothing (7 \div 10)$ мм, расположенных на удалении 5 см друг от друга, установлены стержневые УЭ $\varnothing 4$ мм. Амплитуда импульса управления $(10 \div 30)$ кВ, длительность фронта ~ 10 нс. Разрядник заполнялся N_2 , воздухом, или смесью $N_2 + SF_6$ при давлении $(0,3 \div 0,8)$ МПа. В экспериментах среднее число разрядных каналов, участвующих в коммутации, не превышало 4 даже при оптимальном сочетании полярностей основного ($- U_0$) и управляющего ($+ U_{\text{упр}}$) напряжений и амплитуде основного напряжения, составляющей $(0,8 \div 0,9) U_{\text{сп}}$. Число каналов быстро уменьшалось до одного при снижении уровня U_0 . Следует отметить, что при этом разница времени запаздывания включения отдельных каналов узлов ини-

цирования пробоя в диапазоне $U_0 = (0,8 \div 0,9) U_{\text{сп}}$ не превышала 2 нс при разбросе времени запаздывания пробоя $(1,2 \div 1,5)$ нс. Наиболее вероятной причиной невысокой надежности многоканальной работы в этих условиях, по мнению автора, является быстрый (за единицы наносекунд) спад напряжения на ГИП коммутатора после его замыкания первым разрядным каналом, что обусловлено малым значением искровой постоянной для примененной газовой изоляции ГИП [12]. Существенно большие значения искровой постоянной имеют аргон и криптон. При заполнении ими разрядной камеры в смеси с N_2 было получено существенно большее число каналов, участвующих в коммутации.

В исследовании [11] было также отмечено, что при уменьшении внутреннего сопротивления емкостного накопителя надежность многоканальной работы заметно повышается. Автор объясняет это увеличением времени спада напряжения на ГИП, в результате большее число разрядных каналов успевает замкнуть ГИП.

Кроме того, в [11] обнаружено, что при значительном перенапряжении в ГИП, реализуемом после подачи управляющего импульса, часть узлов поджига перемикается несколькими разрядными каналами, развивающимися с острой кромки УЭ. Однако это не приводит к заметному улучшению коммутационных характеристик данного разрядника.

В работе [13] проведен расчет электростатического поля модельного тригatronа. При равных потенциалах УЭ и основного электрода с отверстием изменение напряженности поля имеет резко неравномерный характер только вблизи УЭ, выступающего над поверхностью ОЭ на расстояние от 0 до 2 мм. Неравномерность поля распространяется на расстояние, несколько превышающее диаметр УЭ. Однако распределение поля вдоль центральной силовой линии значительно отличается от картины поля в промежутке "стержень – плоскость". Кроме того, приводится формула для начального напряжения зажигания разряда, позволяющая определить возможность начала ионизационных процессов в месте расположения УЭ еще до подачи управляющего импульса, а, следовательно, оценить вероятность появления свободных электронов в ГИП вследствие протекания процесса ионизации.

Герасимовым А.И. в [14, С. 30] описан тригatron на 100 кВ с модифицированными электродами. ОЭ $\varnothing 40$ мм размещены на расстоянии 7 мм друг от друга и имеют профилированные поверхности для создания большой области с близким к однородному электрическим полем. УЭ выполнен в виде стержня $\varnothing 7$ мм. Отверстие ОЭ, в котором размещен УЭ, имеет ступенчатую форму с радиальной длиной зазора 3,5 мм у торца УЭ и ниже – 2 мм. Все острые кромки скруглены по радиусу $\sim 0,5$ мм. ОЭ без УЭ имеет напротив торца УЭ плоскую часть с кольцевой канавкой (проточкой) глубиной и шириной $\sim 0,5$ мм. Объем разрядной камеры заполняется смесью 40 % SF_6 и 60 % N_2 при давлении $(0,5 \div 1)$ МПа. Уширение радиального зазора у торца УЭ несколько нарушает равномерность распределения эквипотенциалов между обоими ОЭ при подаче рабочего напряжения и требует увеличе-

ния на $\sim 10\%$ давления газа для сохранения напряжения неуправляемого самопробоя. Но такая геометрия электродов обеспечивает, по мнению автора, следующее. При подаче $U_{упр}$ распределение электрического поля возмущается в большом объеме газа вплоть до поверхности противостоящего ОЭ, находящегося под отрицательным потенциалом. При этом величина электрического поля достигает E_k не только на торцевой и боковой (напротив минимального радиального зазора) поверхности УЭ, но и на поверхности противостоящего ОЭ. Ускоряя пробой могут ионизационные процессы у поверхности кромок кольцевой проточки противостоящего ОЭ, где вследствие усиления поля на микроостриях возникает автоэлектронная эмиссия и взрывы вершин микроострий. Отмечается, что взаимная генерация импульсной подсветкой фотоэлектронов в ГИП и в кольцевом промежутках ускоряет срабатывание тригatrona, увеличивая скорость стримеров в десятки раз. Утверждается, что время t_3 будет минимальным, когда пробой с УЭ на оба ОЭ завершатся одновременно. При этом достигнутые значения времени $t_3 = 25 \pm 5$ нс.

На наш взгляд проявляется некоторое несоответствие в оценке распределения поля в ГИП в [14, С. 30] и в [13]. В [13] отмечается, что при равенстве потенциалов ОЭ и размещенного в нем УЭ (до подачи управляющего импульса) неравномерность поля распространяется на расстояние, несколько превышающее диаметр УЭ. В [14, С. 30] при уширении радиального зазора у торца УЭ и подаче управляющего импульса электрическое поле возмущается на такое же расстояние (диаметр УЭ и расстояние между ОЭ равны по 7 мм).

В [15] приведено описание компактного многоканального газонаполненного разрядника на 3 МВ авторов С. Мерсера, Я. Смита и Т. Мартина. Хотя авторы описывают его работу с позиций разрядника с искажением поля, однако в нем реализуется механизм инициирования срабатывания такой же как и в тригatronе. К тому же он отличается одной особенностью. Вопреки мнению многих других авторов о том, что меньшие времена t_3 наблюдаются в тригatronах с положительной полярностью УЭ, в этом разряднике он расположен ближе к заземленному ОЭ и находился под высоким отрицательным потенциалом. При этом авторы статьи указывают, что в SF_6 , которым заполнялся разрядник при давлении 1,2 МПа, стримеры распространяются предпочтительнее с положительного, а не отрицательного электрода. Возможно, подразумевается, что УЭ находился под высоким отрицательным потенциалом, который он приобретал до подачи управляющего импульса вследствие того, что его форма повторяла эквипотенциаль вблизи заземленного электрода и полярность противоположного ОЭ была отрицательной, но полярность потенциала УЭ после прихода управляющего импульса была все же положительной. ОЭ были выполнены из нержавеющей стали $\varnothing 10$ см с расстоянием между ними 7,6 см. УЭ изготовлен в виде диска $\varnothing 6,5$ см и отстоял от заземленного ОЭ на 5 мм. Корпус выполнен секционированным. При напряжении на разряднике 3 МВ потенциал УЭ составлял 250 кВ. Среднеква-

дратичный разброс времени включения разрядника составлял 0,9 нс. В среднем образовывалось 5 – 6 каналов, довольно равномерно распределенных по окружности УЭ.

В некоторых случаях согласно конструктивным или схемным решениям УЭ тригatrona целесообразно размещать в ОЭ, находящемся под высоким потенциалом. Такой тригatron кратко описан в [16]. Тригatron рассчитан на напряжение 2,5 МВ, максимальное давление смеси N_2+SF_6 в нем равно 1,5 МПа, внешней изоляцией служит трансформаторное масло. Управляющие импульсы с длиной фронта 15 нс и максимальной амплитудой до 300 кВ формируются запускающим устройством, расположенным под высоким потенциалом. Заряд запускающего устройства до 200 кВ от источника постоянного напряжения и его запуск осуществляются через развязывающие сопротивления, изоляция которых рассчитана на полное рабочее напряжение. Включение коммутатора осуществляется с точностью не ниже ± 2 нс. В работе не указывается какую полярность имел ОЭ, в котором размещен УЭ.

В работе [17] мегавольтный коммутатор имеет ОЭ $\varnothing 300$ мм, выполненные по профилю Брюса из нержавеющей стали, расстояние между ними 35 мм. В высоковольтный электрод встроено 6 тригatronных узлов по окружности 180 мм. УЭ тригatrona расположены по центру отверстий $\varnothing 12$ мм и выступают над поверхностью основного электрода на 1 мм. Управляющие импульсы имеют фронт 3 нс и амплитуду до 120 кВ. Максимальное давление SF_6 составляло 0,45 МПа. Пробой коммутатора на заземленный корпус имел многоискровой характер (4 $\div$ 6 каналов). Хотя в работе приведены осциллограммы импульсов напряжения на коммутаторе отрицательной полярности, остается неясным какую полярность имел ОЭ, в котором размещен УЭ. Кроме того, не приведены величины времен t_3 и Δt_3 .

Из зарубежных публикаций, посвященных тригatronам, следует отметить [18]. В ней, в частности, утверждается, что в тригatronах основной вклад в t_3 связан с временем формирования стример – дуга. Предлагаются два возможных механизма ионизации в этот период. Первый – каскадный: ионизация молекул из основного состояния и из возбужденного состояния (после прохождения стримера). Второй – формирование и распространение областей с высокой плотностью ионизации в области с более низкой.

Проведенный анализ литературных источников и выполненные экспериментальные исследования по обеспечению параллельной работы тригatronов, устройство и особенности работы которых опубликованы в [19, 20, 21], позволяют сделать следующее заключение.

Тригatronы с рабочим напряжением до 1 МВ, способные надежно работать в параллель при $t_3 \approx 1$ нс, $\Delta t_3 \leq 1$ нс, $t_k \approx 1$ нс и обладающие высоким ресурсом, должны удовлетворять следующим требованиям:

1. Рабочее напряжение U_p между ОЭ должно находиться в диапазоне $0,85 U_{сп} \leq U_p \leq 0,95 U_{сп}$, где $U_{сп}$ – напряжение самопробоя.
2. Скорость нарастания напряжения управляю-

щего импульса должна быть $dU/dt \geq 10^{13}$ В/с для надежного формирования нескольких разрядных каналов с острой кромки одного УЭ, что улучшает коммутационную характеристику тригatrona. При этом время нарастания управляющего импульса должно быть ≤ 50 нс.

3. После прихода управляющего импульса при достижении между УЭ и противостоящим ему ОЭ напряжения, близкого к пробивному, светящаяся зона первоначальной объемной ионизации должна занимать весь разрядный промежуток (между УЭ и противостоящим ему ОЭ). При этом минимальные t_3 и Δt_3 получаются, когда УЭ имеет положительную полярность как относительно противостоящего ему, так и относительно охватывающего его ОЭ. Последнее может иметь место как в случае, когда УЭ встроен в низковольтный ОЭ (тогда противостоящий ОЭ находится под высоким потенциалом отрицательной полярности), так и в случае, когда УЭ встроен в высоковольтный электрод положительной полярности.

4. Расстояние между ОЭ (ГИП) должно быть выбрано, исходя из возможности удовлетворения двух условий:

- заполнения всего ГИП зоной первоначальной ионизации между УЭ и противостоящим ему ОЭ после прихода управляющего импульса;

- обеспечения в ГИП напряженности электрического поля, достаточной ($\geq 4 \times 10^5$ В/см) для уменьшения t_3 и Δt_3 вследствие автоэмиссии электронов с микровыступов поверхности катода.

5. На рабочей поверхности ОЭ, противостоящей УЭ, для усиления возмущений электрического поля после прихода управляющего импульса желательна кольцевая канавка с диаметром, соответствующим диаметру рабочей зоны электрода, и с радиусом скругления $\sim 0,5$ мм.

6. УЭ должен иметь форму цилиндра $\varnothing (4 \div 8)$ мм, острая кромка торца которого, обращенная к противостоящему ОЭ, должна иметь радиус закругления $(0,1 \div 0,2)$ мм. УЭ должен выступать вглубь главного искрового промежутка на $0,1 \div 0,5$ мм.

7. Отношение величины главного искрового промежутка D к величине поджигающего разрядного промежутка d между УЭ и прилегающим к нему ОЭ должно находиться в диапазоне $5 \div 7$, а d должно удовлетворять неравенству $d \leq 2,5$ мм.

8. Для обеспечения ресурса 10^9 импульсов и более тригatron должен:

- содержать в разрядной камере защитный металлический экран, находящийся примерно под половинным потенциалом относительно потенциала на высоковольтном ОЭ;

- длина разрядной камеры вдоль внутренней изоляционной поверхности должна, по меньшей мере, в 3 раза превышать длину ГИП (при этом градиент вдоль поверхности не должен превышать ~ 100 кВ/см) для исключения пробоев по внутренней поверхности.

9. Разрядная камера тригatrona для уменьшения t_3 и Δt_3 и обеспечения хороших коммутационных характеристик может быть заполнена элегазом SF_6

или смесью газов с высокой электрической прочностью (например, 10% SF_6 и 90% N_2) под избыточным давлением $> 0,5$ МПа. Для технологической установки при прочих равных условиях выбор состава газовой среды может быть осуществлен разрешением компромисса между чистым SF_6 и смесью (10% SF_6 и 90% N_2). В чистом SF_6 можно обеспечить меньшие разрядные промежутки и давление, но он дороже.

10. Электроды тригatrona должны быть выполнены из стойких к эрозии проводящих материалов, эрозия которых происходит равномерно и медленно (например, из стали Ст3 или сплавов вольфрама, молибдена с медью) или же конструкция электродов должна предусматривать быструю и легкую замену сменных рабочих частей электродов для обеспечения высокого ресурса.

11. Отношение оптимальной амплитуды управляющего импульса $U_{упр}$ к амплитуде напряжения U_p между ОЭ тригatrona уменьшается с увеличением U_p и при $300 \text{ кВ} \leq U_p \leq 1000 \text{ кВ}$ должно составлять $0,1 \div 0,3 U_p$.

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

Упрощенное изображение электродной системы тригatrona, удовлетворяющего вышеперечисленным требованиям, приведено на рис. 2, где 1,2 – ОЭ; 3 – УЭ; 4 – защитный экран; 5 – корпус тригatrona; $D < 2a$, а – кратчайшее расстояние между ОЭ и защитным экраном.

ВЫВОДЫ

1. Проведенный анализ технической литературы позволяет выделить два основных механизма инициирования пробоя тригatrona: "медленный" и "быстрый" механизмы. При "медленном" (наблюдается $t_3 \sim 1$ мкс и более; $\Delta t_3 \sim 0,1$ мкс и более) пробой инициируется действием поджигающей искры в промежутке между УЭ и прилегающим ОЭ. При "быстром" механизме (существенно меньшие $t_3 \leq 20$ нс; $\Delta t_3 \leq 5$ нс) инициирование пробоя вызвано действием сильного резконеоднородного электрического поля вблизи конца УЭ. При "медленном" механизме первым пробивается поджигающий промежуток, а при "быстром" – первым пробивается промежуток между УЭ и противостоящим ему ОЭ.

2. Пробой тригatrona по "быстрому" механизму осуществляется в два этапа. Первый – стример (или несколько стримеров) формируется в области усиленного поля вблизи конца УЭ (или занимая более значительную часть ГИП, в предельном случае весь ГИП по длине – от конца УЭ до противостоящего ОЭ) и распространяется через весь ГИП. Второй – интенсивность ионизации в образовавшемся (-шихся) канале (-лах) под действием поля увеличивается, пока не сформируется хорошо проводящий искровой канал (-лы), пробивается поджигающий промежуток, и тригatron замыкается искрой (искрами).

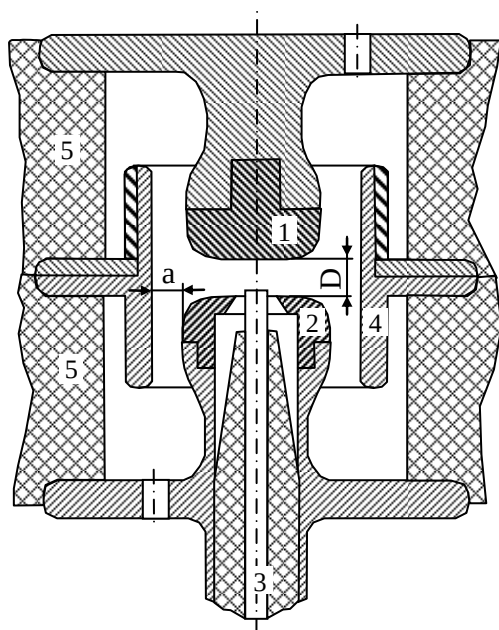


Рис. 2

3. Несмотря на более чем полувековой период разработки и исследования тригatronов остаются до сих пор не вполне понятными отдельные стадии процессов, происходящих в них. В частности, требуют дальнейших исследований процессы, связанные с формированием искрового канала (каналов) в тригatronе и занимающие по времени значительную часть t_s .

4. Выработаны требования к тригatronам с высоким ресурсом, параллельная работа которых может обеспечить коммутацию мощностей порядка 1 ТВт и более.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стекольников И.С. Молния. М., изд-во АН СССР, 1943.
2. Lampe W. ETZ-A, 83H, 18, 591 (1962).
3. Sletten A.M., Lewis T.J. Proc. Inst. Electr. Engrs, Pt.C, 104, No. 5, 54 (1957).
4. Saxe R.F. Proc. Of the 5-th Intern. Conf. on Ioniz. Phenomena in Gases, V. 1, Amsterdam, 1962.
5. Шкурпат П.И. Ж. техн. физ., 30, 954 (1960).
- 6]. Дашук П.Н., Зайенц С.Л., Комельков В.С., Кучинский Г.С., Николаевская Н.Н., Шнейерсон Г.А. Техника больших импульсных токов и магнитных полей. Под ред. В.С. Комелькова. – М.: Атомиздат, 1970. – 472 с.
7. Ковальчук Б.М., Кремнев В.В., Поталицын Ю.Ф. Сильноточные наносекундные коммутаторы. – Новосибирск: Наука, 1979, 175 с.
8. Ельчанинов А.С., Емельянов В.Г., Ковальчук Б.М., Месяц Г.А., Поталицын Ю.Ф. Многоискровая работа мегавольтного тригatronа // Приборы и техника эксперимента. – 1974. - № 2. – С. 103 – 105.
9. Ковальчук Б.М., Лавринович В.А., Подковыров В.Г., Поталицын Ю.Ф. О механизме наносекундного режима работы мегавольтных тригatronов. – В кн.: Тезисы докладов III Всесоюзного симпозиума по сильноточной импульсной электронике. Томск, Ин – т сильноточной электроники, 1978. – С. 143 – 144.
10. Емельянов В.Г., Ковальчук Б.М., Лавринович В.А., Месяц Г.А., Поталицын Ю.Ф. Многоискровой высоковольтный тригatron // Приборы и техника эксперимента. – 1975 - № 4 – С. 89 – 92.

11. Капишников Н.К. Высоковольтный рельсовый разрядник тригatronного типа // Приборы и техника эксперимента. – 1989. - № 2. – С. 127 – 133.
12. Месяц Г.А. Генерирование мощных наносекундных импульсов. – М.: Сов. Радио, 1974. – 255 с.
13. Елисеева Н.Н., Никифоров М.Г. К расчету начальных напряжений тригatronа, наполненного SF_6 – Высоковольтные искровые и взрывные коммутаторы. Тезисы докладов совместного заседания секций научных советов АН СССР "Научные основы электрофизики и электроэнергетики" и "Проблемы мощной импульсной энергетики". Томск, 27 – 28 ноября 1986 г. – С. 13 – 15.
14. Герасимов А.И. Многоканальные разрядники с ламельными управляющими электродами, их развитие и применение // Приборы и техника эксперимента. – 2004. - №1. – С. 5 – 38.
15. Накопление и коммутация энергии больших плотностей. Под ред. У. Бостика, В. Нарди, О. Цукера. Пер. с англ. Под ред. д-ров техн. наук Э.И. Асиновского и В.С. Комелькова. – М.: Мир, 1979. – С. 414 – 420.
16. Евлампиев С.Б., Коршунов Г.С. Управляемый газонаполненный коммутатор на 5 МВ. – Высоковольтные искровые и взрывные коммутаторы. Тезисы докладов совместного заседания секций научных советов АН СССР "Научные основы электрофизики и электроэнергетики" и "Проблемы мощной импульсной энергетики". Томск, 27 – 28 ноября 1986 г. – С. 29.
17. Валеев Р.И., Давыдов О.В., Никифоров М.Г., Харченко А.Ф., Чумаков А.А. Многоканальный мегавольтный коммутатор с поджигом на высоком потенциале. – Высоковольтные искровые и взрывные коммутаторы. Тезисы докладов совместного заседания секций научных советов АН СССР "Научные основы электрофизики и электроэнергетики" и "Проблемы мощной импульсной энергетики". Томск, 27 – 28 ноября 1986 г. – С. 77 – 78.
18. 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.
19. Бойко Н.И., Евдошенко Л.С., Зароченцев А.И., Иванов В.М. Четырехканальный высоковольтный искровой разрядник // Электротехника і Електромеханіка. – Харьков: НТУ "ХПИ".-2006. - №3. – С. 80-81.
20. Бойко Н.И., Евдошенко Л.С., Зароченцев А.И., Иванов В.М., Артюх В.Г. Тригatronы на 400 кВ для мощных низкоиндуктивных генераторов импульсов // ПТЭ, 2008, №1, С. 78 – 86.
21. Бойко Н.И., Евдошенко Л.С., Зароченцев А.И., Иванов В.М. Тригatronы на рабочее напряжение до 1 МВ с наносекундным временем срабатывания // Технічна електродинаміка. – 2009. - № 1. – С. 38 – 43.

Поступила 18.05.2009

Бойко Николай Иванович, д.т.н.,
Евдошенко Леонид Свиридович,
Зароченцев Александр Иванович,
Иванов Владимир Михайлович,
Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт "Молния" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт",
Украина, 61013, Харьков, ул. Шевченко, 47.
e-mail: eft@kpi.kharkov.ua, тел. (057) 7076183.