

## ЛИТЕРАТУРА

1. Яценко Н. А. Связь высокого постоянного потенциала плазмы с режимом горения высокочастотного емкостного разряда среднего давления.— ЖТФ, 1981, т. 51, № 6.
2. Мышенков В. Н., Яценко Н. А. Перспективы использования высокочастотного электрического поля.— Квант. электроника, 1981, т. 8, № 10.
3. Пашкин С. В. Об анодной области высоковольтного диффузного разряда при средних давлениях.— ТВТ, 1976, т. 14, № 3.
4. Дыхне А. М., Напартович А. П. О приэлектродной неустойчивости плазмы газового разряда.— ДАН СССР, 1979, т. 247, № 4; Гладуш Г. Г., Самохин А. А. Теоретическое рассмотрение электродинамической неустойчивости тлеющего разряда. Закон нормальной плотности тока. Препринт ИАЭ-3103, 1979; Численное исследование шнурования тока на электродах в тлеющем разряде.— ПМТФ, 1981, № 5.
5. Шапиро Г. П., Сорока А. М. Возникновение вынужденной амбиполярной диффузии под действием высокочастотного электрического поля.— Письма в ЖТФ, 1979, т. 5, № 3.
6. Баркалов А. Д., Самохин А. А. О балансе плазмы в объеме высокочастотного тлеющего разряда. Препринт ИАЭ-4147, 1985.
7. Браун С. Элементарные процессы в плазме газового разряда.— М.: Атомиздат, 1961.
8. Смирнов А. С. Приэлектродные слои в емкостном ВЧ-разряде.— ЖТФ, 1984, т. 54, № 1.
9. Акишев Ю. С., Высикайло Ф. И. и др. Исследование квазистационарного разряда в азоте.— ТВТ, 1980, т. 18, № 2.

Поступила 9/IX 1985 г.

УДК 621.374.2

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ЗАПУСКА МАСЛОНАПОЛНЕННЫХ ТРИГАТРОННЫХ РАЗРЯДНИКОВ

*Н. К. Капишников, В. М. Муратов*

(Томск)

Сопоставительный анализ различных типов высоковольтных управляемых разрядников с жидкой изоляцией, проведенный в [1, 2], показал, что в настоящее время наиболее перспективны для применения в высоковольтных импульсных устройствах благодаря своей простоте и надежности разрядники тригатронного типа, в которых возможна реализация двух основных механизмов инициирования разряда — инициирование усилением поля в области управляющего электрода [2, 3] и запуск искрой в поджигающем зазоре [4, 5]. Первый тип тригатронных разрядников к настоящему времени исследован достаточно хорошо лишь при малых временах воздействия напряжения [3, 6, 7], поэтому они находят применение в основном при коммутации формирующих линий генераторов мощных наносекундных импульсов с «быстрой» (0,5—1,5 нс) зарядкой [8, 9]. Второй тип тригатронных коммутаторов на сегодня практически не находит применения в высоковольтной импульсной технике из-за неудовлетворительных временных характеристик.

В настоящей работе приведены результаты изучения временных характеристик маслonaполненных тригатронных разрядников обоих типов, работающих в режиме формирования заднего фронта прямоугольного импульса напряжения амплитудой до 800 кВ, длительностью 1—100 нс. Цель исследований — нахождение оптимальных условий запуска тригатронных разрядников с жидкой изоляцией в области микросекундных экспозиций напряжения.

Эксперименты проведены на установке [10]. Испытываемый разрядник размещен в цилиндрической камере диаметром 45 см, длиной 27 см. Высоковольтный электрод разрядника выполнен в виде цилиндра диаметром 20 см, установленного коаксиально внутри камеры. Заземленный электрод диаметром 10 см установлен радиально в трубке длиной 8 см. В центре заземленного электрода в отверстии диаметром 2 см установлен управляющий электрод. Камера с испытываемым разрядником заполняется трансформаторным маслом с пробивным напряжением в стандартном пробойнике ~ 50 кВ. Трансформаторное масло не заменялось и не очищалось в течение всего эксперимента. Влияния загрязнения масла продуктами разряда на временные характеристики разрядников обоих типов в реализованных условиях не обнаружено.

Обработка результатов производилась методом наименьших квадратов по 50 измерениям на точку (установлено, что закон распределения времени запаздывания срабатывания тригатронных разрядников обоих типов близок к нормальному).

**Тригатронный разрядник с инициированием разряда усилением поля.** В момент приложения к управляющему электроду разрядника импульса напряжения с крутым фронтом первоначальное, близкое к равномерному,

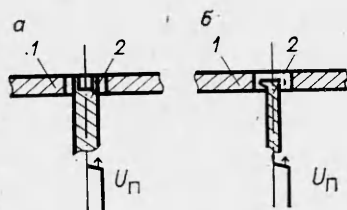


Рис. 1

электрическое поле в основном промежутке тригatronного разрядника искажается и вблизи управляющего электрода превращается в резко неоднородное [11], причем степень неоднородности электрического поля, определяющая временные характеристики тригatronного разрядника с иницированием пробоя усилением поля, зависит в основном от сочетания полярностей основного и поджигающего напряжений, амплитуды управляющего напряжения и геометрии поджигающего узла. С учетом эффекта полярности, присущего разряду в жидкости, лучшие временные характеристики разрядника с иницированием пробоя усилением поля могут быть достигнуты при отрицательной полярности основного напряжения и положительной полярности напряжения поджига, причем, согласно [6], амплитуда управляющего напряжения  $U_{п}$  должна составлять 0,2—0,3 от напряжения неуправляемого пробоя разрядника  $U_{сп}$ .

При выборе конфигурации поджигающего узла необходимо исходить из следующих требований: 1) минимальное искажение поля в основном разрядном промежутке до подачи управляющего напряжения; 2) достижение существенного усиления поля вблизи управляющего электрода после приложения  $U_{п}$ . Оба эти условия выполняются для конструкции поджигающего узла, показанной на рис. 1, а (1 — основной, 2 — поджигающий электроды). Торцевая часть управляющего электрода диаметром 0,8 см устанавливается заподлицо с поверхностью основного электрода и выполнена с продольным отверстием диаметром 0,5 см, глубиной 0,6 см, что позволяет достичь почти двукратного увеличения коэффициента усиления поля при подаче управляющего напряжения по сравнению со стержневым управляющим электродом.

Импульс управляющего напряжения положительной полярности амплитудой до 200 кВ, с длительностью фронта  $\sim 10$  нс формируется генератором, выполненным по схеме Аркадьева — Маркса, конструкция и основные характеристики которого описаны в [12].

Результаты измерения времени запаздывания срабатывания  $t_3$  (линия 1) тригatronного разрядника и разброса  $\sigma_3$  (линия 2) в зависимости от времени подачи управляющего напряжения  $t_{п}$  ( $t_{п}$  — интервал времени от момента приложения основного напряжения до момента подачи напряжения поджига) при постоянной амплитуде основного напряжения  $U_3 = 410$  кВ, что при  $t_{п} > 20$  мкс примерно соответствует  $0,7U_{сп}$  ( $U_{сп}$  — напряжение неуправляемого пробоя разрядника с вероятностью 50%), приведены на рис. 2 (здесь и далее сплошными линиями изображены зависимости  $t_3$ , штриховыми —  $\sigma_3$ ). Длина основного промежутка разрядника  $d_0 = 3$  см, амплитуда управляющего напряжения 170 кВ.

Из рис. 2 видно, что с увеличением времени подачи управляющего напряжения имеет место уменьшение  $t_3$  и  $\sigma_3$ , причем оно весьма существенно при  $t_{п} < 20$  мкс и очень незначительно при больших временах. Эта зависимость непосредственным образом связана с ходом вольтсекундной характеристики пробоя трансформаторного масла при воздействии прямоугольного импульса напряжения микросекундной длительности (ли-

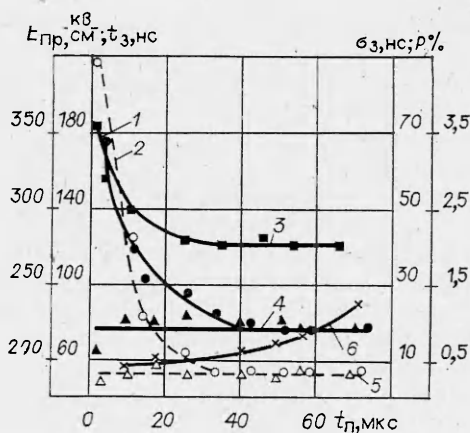


Рис. 2

ния  $\mathcal{E}$  на рис. 2, полученная при измерении электрической прочности  $E_{пр}$  в однородном поле при  $d_0 = 1,2$  см и эффективной площади электродов  $100$  см<sup>2</sup>). При  $t_{п} < 20$  мкс с уменьшением времени воздействия напряжения увеличивается  $U_{сп}$ . Поэтому при постоянном значении  $U_3$  уменьшается соотношение  $U_3/U_{сп}$ , что ведет к росту  $t_3$  и  $\sigma_3$  [6]. При  $t_{п} > 20$  мкс напряжение неуправляемого пробоя изменяется слабо и временные характеристики разрядника практически не меняются.

Линиями 4, 5 показаны результаты измерения  $t_3$  и  $\sigma_3$  в зависимости от  $t_{п}$ , полученные при неизменном соотношении  $U_3/U_{сп} = 0,7$ . В этих условиях временные характеристики испытываемого разрядника зависят от времени воздействия основного напряжения лишь при  $t_{п} < 5$  мкс, да и в этом диапазоне зависимость временных характеристик от  $t_{п}$  достаточно слабая, т. е. тригatronный разрядник с иницированием пробоя усилением поля надежно работает во всем исследованном диапазоне  $t_{п}$ . Однако с увеличением времени воздействия основного напряжения растет вероятность неуправляемого срабатывания разрядника (зависимость вероятности неуправляемого пробоя разрядника  $P$  от  $t_{п}$  при  $U_3/U_{сп} = 0,7$  приведена на рис. 2 (кривая б)). Поэтому при  $t_{п} > 20-30$  мкс для обеспечения надежной работы разрядника необходимо выбирать максимальное значение  $U_3$  на уровне  $\sim 0,7U_{сп}$ , что заметно сужает диапазон непрерываемой работы разрядника (минимальное значение  $U_3$ , при котором в реализованных условиях разрядник надежно управляется,  $\sim 0,6U_{сп}$ ).

С учетом слабо выраженной зависимости временных характеристик тригatronного разрядника с запуском усиления поля от времени подачи управляющего напряжения во всем исследованном диапазоне можно сделать вывод, что при микросекундных временах воздействия основного напряжения в качестве оптимальных условий запуска могут быть использованы режимы, рекомендованные в [6] для субмикросекундных экспозиций основного напряжения. Данный вывод подтвержден специально проведенными исследованиями характеристик тригatronного разрядника в зависимости от параметров управляющего напряжения и геометрии поджигающего узла.

#### Тригatronный разрядник с запуском искрой в поджигающем зазоре.

При пробое поджигающего зазора образуется расширяющаяся под действием избыточного давления полость, заполненная плазмой, которая является источником интенсивных ударных волн, распространяющихся в глубь основного разрядного промежутка. При продвижении ударной волны в жидкости за ее фронтом образуются кавитационные газопаровые полости, в которых при определенных условиях возможно протекание ионизационных процессов (это будет иметь место в том случае, если характерный размер кавитационных полостей превышает длину свободного пробега электронов в среде, заполняющей полость), приводящих к зажиганию разряда и его формированию в глубь разрядного промежутка. Кроме того, на границе раздела газопаровых полостей и жидкости возможно образование объемных (или поверхностных) зарядов, которые искажают поле в основном промежутке разрядника и тем самым дополнительно способствуют протеканию процессов на стадиях зажигания и развития разряда. Поскольку иницирование разряда искрой связано с относительно медленным гидродинамическим расширением канала поджигающей искры (характерная скорость этого процесса имеет порядок скорости звука в жидкости), следует ожидать, что данный режим запуска разрядника более инерционный по сравнению с механизмом иницирования разряда усилением поля.

Скорость расширения канала поджигающей искры, а следовательно, и характерные размеры зоны возмущения, распространяющейся от нее, в значительной степени зависят от скорости ввода энергии в канал поджигающей искры, которая, в свою очередь, определяется параметрами разрядного контура генератора поджигающих импульсов и сопротивлением канала поджигающей искры [13]. Исходя из этих предположений и выбраны параметры генератора поджигающих импульсов и конфигурация поджигающего узла, показанная на рис. 1, б. Управляющий элект-

род выполнен в виде стержня диаметром 0,5 см, торцевая часть которого снабжена диском с заостренной кромкой. Подобная конструкция поджигающего электрода позволяет существенно уменьшить время запаздывания пробоя пускового зазора  $t_{зп}$  и увеличить длину поджигающей искры, а значит, повысить ее активное сопротивление, чем достигается увеличение скорости выделения энергии в поджигающей искре. При длине поджигающего промежутка  $d_{п} = 0,2—0,35$  см и амплитуде управляющего напряжения  $> 40$  кВ  $t_{зп}$  не превышает 0,1 мкс. Для уменьшения степени искажения электрического поля в основном промежутке разрядника при подаче импульса поджига управляющий электрод заглублен по отношению к рабочей поверхности основного электрода на 0,15—0,3 см.

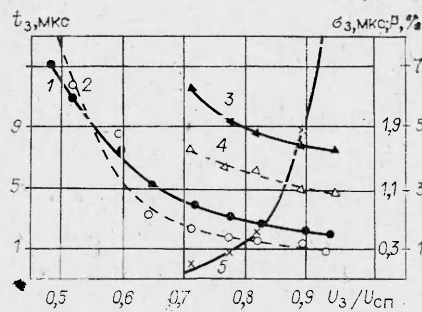
Накопительный конденсатор генератора поджигающих импульсов коммутируется газонаполненным разрядником тригатронного типа, формируя импульсы напряжения амплитудой до 100 кВ с длительностью фронта  $\leq 0,1$  мкс. Индуктивность разрядного контура генератора  $\sim 1$  мкГ.

Исследована работа тригатронного разрядника с запуском искрой при различных сочетаниях полярностей основного и поджигающего напряжений. Показано, что при положительной полярности основного напряжения (при иницировании разряда с катода) для обеих полярностей управляющего напряжения разрядник практически не управляется даже в режиме, близком к самопробое. Это свидетельствует о том, что при развитии разряда со стороны катода образование газопаровых полостей и процессы, происходящие в них, не оказывают заметного влияния на зажигание и развитие разряда в жидкостях.

При отрицательной полярности основного напряжения лучшие временные характеристики и больший диапазон неперестраиваемой работы получены при положительной полярности импульса поджига. Это представлено на рис. 3, где даны результаты измерения  $t_3$  и  $\sigma_3$  в зависимости от соотношения  $U_3/U_{сп}$  при положительной (линии 1, 2) и отрицательной (линии 3, 4) полярностях поджигающего напряжения. Длина основного промежутка разрядника 3 см,  $d_{п} = 0,3$  см,  $t_{п} = 10$  мкс,  $U_{п} = 55$  кВ, емкость в разряде пускового генератора  $C_{п} = 0,2$  мкФ.

При отрицательной полярности поджигающего напряжения работа разрядника становится ненадежной уже при  $U_3 < 0,7U_{сп}$ . В тех же условиях при положительной полярности управляющего напряжения устойчивая работа разрядника наблюдается даже при  $U_3 < 0,5 U_{сп}$ . Меньший диапазон неперестраиваемой работы тригатронного разрядника при отрицательной полярности управляющего напряжения и низкие временные характеристики обусловлены, по-видимому, различием пространственной структуры разряда в поджигающем зазоре при смене полярности острейшего электрода [1], которым в данном случае является управляющий электрод. При положительной полярности острейшего электрода разряд в жидкости развивается в виде ветвистого «куста», занимающего сравнительно большой объем, тогда как при отрицательной полярности острия разряд формируется в виде отдельных отшнурованных нитей [1]. Большой объем возмущенной жидкости при положительной полярности острейшего электрода облегчает процессы на стадии зажигания и формирования разряда в основном разрядном промежутке тригатронного разрядника. Этому благоприятствует также значительный положительный потенциал (обусловлен высоким продольным градиентом поля в канале искры при пробое жидкостей [13]), выносимый поджигающей искрой в основной разрядный промежуток и приводящий к перераспределению поля в нем.

Из анализа временных характеристик тригатронного разрядника с запуском искрой и вероятности неуправляе-



Р и с . 3

мого пробоя основного зазора (линия 5 на рис. 3) следует, что при отрицательной полярности основного и поджигающего напряжений надежная работа разрядника возможна лишь при  $U_3 \sim 0,7U_{сп}$ , что делает бесперспективным применение данного сочетания полярностей  $U_3$  и  $U_{п}$  на практике, поэтому в дальнейшем все исследования проведены при отрицательной полярности основного напряжения и положительной полярности напряжения поджига.

При неизменной индуктивности разрядного контура генератора поджигающих импульсов и постоянной длине пускового зазора энергия, выделяющаяся в поджигающей искре, а следовательно, и временные характеристики тригatronного разрядника с запуском искрой будут зависеть от величины емкости в разряде генератора поджигающих импульсов и амплитуды напряжения поджига. Измерение временных характеристик разрядника в зависимости от  $C_{п}$  при изменении последней от 0,05 до 0,6 мкФ ( $U_{п} = 55$  кВ) показало, что при увеличении  $C_{п}$  временные характеристики улучшаются вплоть до  $C_{п} \approx 0,3$  мкФ. При дальнейшем увеличении  $C_{п}$  наблюдается возрастание времени запаздывания срабатывания разрядника. Стабильность срабатывания при этом практически не меняется. По осциллограммам тока в иоджигающей искре  $i_{п}(t)$  и управляющего напряжения  $U_{п}(t)$  проведена оценка величины энергии, выделившейся в канале поджигающей искры к моменту срабатывания разрядника

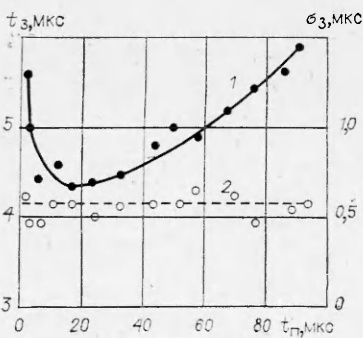
$$W_{в} \left( W_{в} = \int_0^{t_3} i_{п}(t) U_{п}(t) dt \right),$$

которая и определяет процессы в основном промежутке тригatronного разрядника и скорость их протекания. Показано, что при увеличении  $C_{п}$  больше 0,3 мкФ скорость выделения энергии в поджигающей искре уменьшается, что, по-видимому, связано с уменьшением активного сопротивления канала поджигающей искры при увеличении  $C_{п}$ . Это и приводит к возрастанию  $t_3$  при  $C_{п} > 0,3$  мкФ.

Исследование временных характеристик тригatronного разрядника в зависимости от  $U_{п}$  при изменении амплитуды основного напряжения в диапазоне 200—800 кВ показывает, что достаточна амплитуда управляющего напряжения, равная 40—60 кВ. При  $U_{п} > 60$  кВ, несмотря на заглубление управляющего электрода, в ряде случаев наблюдается инициирование разряда усилением поля, в результате чего существенно возрастает разброс срабатывания разрядника. При  $U_{п} < 40$  кВ заметно уменьшается зона возмущения от поджигающей искры, что приводит к существенному ухудшению основных характеристик разрядника.

На рис. 4 приведены результаты измерения временных характеристик разрядника в зависимости от времени подачи управляющего напряжения  $t_{п}$  при постоянной амплитуде основного напряжения  $U_3 = 410$  кВ. Длина основного зазора разрядника 3 см,  $d_{п} = 0,3$  см,  $U_{п} = 50$  кВ,  $C_{п} = 0,1$  мкФ.

Из рис. 4 видно, что зависимость  $t_3 = f(t_{п})$  (линия 1) имеет два участка; на первом при увеличении  $t_{п}$  вплоть до 10 мкс наблюдается уменьшение  $t_3$ , на втором при  $t_{п} > 20$  мкс увеличение  $t_{п}$  приводит к возрастанию



Р и с. 4

времени запаздывания срабатывания разрядника. Стабильность срабатывания во всем исследованном диапазоне  $t_{п}$  изменяется очень слабо (линия 2). Первый участок связан с ходом вольтсекундной характеристики пробоя трансформаторного масла (линия 3 на рис. 2). Увеличение  $t_3$  на втором участке обусловлено, по-видимому, спадом вершины импульса основного напряжения (при длительности импульса 100 мкс спад вершины основного напряжения  $\sim 15\%$ ). При росте времени воздействия основного напряжения больше 50 мкс наблюдается увеличение минимального значения соотношения  $U_3/U_{сп}$ ,

при котором еще имеет место надежный управляемый режим работы тригатронного разрядника. Например, при  $t_{п} = 90$  мкс минимальное значение  $U_{э}/U_{сн} \sim 0,55$ , тогда как при  $t_{п} = 10$  мкс оно равно 0,4.

Таким образом, проведенными исследованиями показана возможность применения тригатронных разрядников с иницированием разряда усилением поля и с запуском искрой в высоковольтной импульсной технике в широком диапазоне изменения времени воздействия основного напряжения. Найдены близкие к оптимальным условия запуска тригатронных разрядников обоих типов. Показано, что работа тригатронного разрядника с иницированием разряда усилением поля, имеющего высокие быстродействие и стабильность включения, характеризуется узким диапазоном рабочих напряжений, а для запуска этого типа коммутаторов требуется повышенная амплитуда управляющего напряжения. Тригатронный разрядник с запуском искрой в поджигающем зазоре при удовлетворительных временных характеристиках имеет более широкий диапазон неперестраиваемой работы и требует в 4—5 раз меньшей амплитуды управляющего напряжения, что существенно повышает надежность работы изоляции поджигающего узла и передающего кабеля.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ушаков В. Я. Импульсный электрический пробой жидкостей.— Томск: Томск. ун-т, 1975.
2. Муратов В. М. Исследование управляемого иницирования разряда в воде применительно к высоковольтным наносекундным коммутаторам. Автореф. канд. дис.— Томск: Томск. политехн. ин-т, 1977.
3. Балалаев В. В., Капишников Н. К. и др. Мегавольтные водяные разрядники тригатронного типа.— ПТЭ, 1977, № 5.
4. Аксенов И. И., Бочаров В. К., Смирнов С. А. Возбуждение управляемого разряда в жидкости. Препринт ФТИ АН УССР.— Харьков, 1968, № 193.
5. Либенсон В. А., Файнберг Г. С., Смирнов С. А. Исследование разряда в схеме с управляемым поджигом в воде.— ЭОМ, 1970, № 4.
6. Капишников Н. К., Муратов В. М., Ушаков В. Я. Высоковольтные разрядники, наполненные трансформаторным маслом.— ПТЭ, 1978, № 4.
7. Балалаев В. В., Капишников Н. К. и др. Управляемые многоканальные разрядники с водяной изоляцией.— ПМТФ, 1978, № 5.
8. Желтов К. А., Малыгин А. В. и др. Сильноточный наносекундный ускоритель электронов со стабильной энергией 1 МэВ.— ПТЭ, 1981, № 5.
9. Бакшт Р. Б., Коростелев А. Ф. и др. Генератор мощных наносекундных импульсов СНОП-1.— ПТЭ, 1982, № 1.
10. Капишников Н. К., Муратов В. М. Генератор высоковольтных импульсов микросекундной длительности.— ЭОМ, 1983, № 4.
11. Шкуропат П. И. К вопросу о механизме управляемого пробоя тригатрона.— В кн.: Электрофизическая аппаратура и электрическая изоляция. М.: Энергия, 1970.
12. Капишников Н. К., Муратов В. М. Генератор высоковольтных субмикросекундных импульсов.— ПТЭ, 1984, № 1.
13. Наугольных К. А., Рой Н. А. Электрические разряды в воде.— М.: Наука, 1971.

Поступила 2/X 1985 г.

УДК 537.527

### ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ РАЗВИТИЯ СИЛЬНОТОЧНОГО РАЗРЯДА, ВОЗБУЖДАЕМОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ВЗРЫВОМ ВОЛЬФРАМОВОЙ ПРОВОЛОЧКИ

В. П. Исаков

(Красноярск)

Сильноточные разряды в разреженных газах изучались в [1—3], а примерно с середины 60-х годов они стали использоваться в качестве источников излучения для накачки оптических квантовых генераторов [4], в частности для накачки иодных, фотодиссоционных лазеров. Интерес к этим лазерам объясняется тем, что полосы поглощения молекул, соответствующие их диссоциации, сравнимы по ширине с полоса-