

Твердотельный разрядник для систем формирования импульса тока в низкоимпедансных нагрузках индуктивных накопителей электромагнитной энергии

© А.А. Базанов, В.Ш. Шайдуллин, А.Н. Ерофеев

Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,
607188 Саров, Нижегородская обл., Россия
e-mail: aab@elph.vniief.ru

Поступило в Редакцию 19 августа 2021 г.
В окончательной редакции 23 марта 2022 г.
Принято к публикации 25 марта 2022 г.

Рассмотрено применение твердотельного разрядника с прикатодным локализованным усилением электрического поля, работающего в паре с открывающим ключом индуктивного накопителя, для формирования быстронарастающего импульса тока в низкоимпедансной нагрузке. Указаны физические факторы, приводящие к повышению эффективности обострения импульса. Предложен вариант технического исполнения разрядника. Изложена методика определения его параметров в зависимости от требований и условий эксперимента. Приведены результаты экспериментов на стационарной установке, демонстрирующие возможность генерации в нагрузках индуктивностью ~ 10 нН мегаамперных импульсов тока с фронтом нарастания ~ 100 нс. На основании полученных результатов рекомендовано использование разрядников этого типа для формирования мультимегаамперных импульсов тока с субмикросекундным фронтом нарастания (вплоть до ~ 100 нс) для индуктивных накопителей энергии, в частности, таких, как взрывомагнитные (магнитокумулятивные) генераторы, в схемах с низкоимпедансными нагрузками.

Ключевые слова: твердый (конденсированный) диэлектрик, задержка пробоя, перенапряжение.

DOI: 10.21883/JTF.2022.06.52517.241-21

Введение

Индуктивные накопители электромагнитной энергии используются в физическом эксперименте в качестве промежуточных устройств накопления энергии, поступающей в них от первичных источников тока, таких, например, как конденсаторные батареи и взрывомагнитные (магнитокумулятивные) генераторы. Преимуществом индуктивных накопителей является возможность концентрации значительной энергии в относительно небольших объемах (по сравнению с емкостными накопителями плотность энергии может быть выше на несколько порядков), а также использование относительно простого способа выведения энергии в нагрузку путем разрыва его электрического контура. Разрыв контура осуществляют, например, с помощью взрывных или электровзрывных размыкателей тока. Чем меньше время требуется на разрыв контура, тем большая мощность может быть передана в нагрузку. В настоящее время разработаны размыкатели тока, позволяющие разрывать контур индуктивного накопителя за время $\sim 0.5\text{--}1$ мкс и примерно за такое же время передавать мультимегаамперный ток в низкоимпедансную нагрузку с физически значимой индуктивностью ~ 10 нН [1]. Однако для решения ряда важных задач (например, генерации мощных потоков мягкого рентгеновского излучения) требуются импульсы тока с фронтом нарастания ~ 100 нс диапазоном от 5–20 МА для модельных исследований и до

80 МА для зажигания реакции термоядерного синтеза в микромишенях [2,3].

Известно, что сократить время выведения энергии (повысить мощность, передаваемую в нагрузку) можно за счет применения низкоиндуктивного разрядника, последовательно устанавливаемого в цепь нагрузки, который срабатывает при достижении относительно высокого уровня напряжения (близкого к амплитудному значению), возникающего в процессе разрыва контура индуктивного накопителя [4–6]. При этом важно, чтобы пробой разрядника происходил до начала падения напряжения на размыкающем ключе во избежание снижения пиковой мощности, передаваемой в нагрузку. Максимальная эффективность обострения тока достигается в случае идеального разрядника, сопротивление которого мгновенно падает до нуля. На практике требование идеальности в сочетании со способностью пропускать мультимегаамперные токи являлось основным препятствием для создания подобных коммутационных устройств. Способ, с помощью которого можно добиться такого поведения от твердотельного разрядника, рассматривается в настоящей работе.

Выбор типа разрядника был обусловлен следующими соображениями.

Разработка разрядника изначально была ориентирована на возможность его применения в едином конструктивном блоке с взрывным или электровзрывным размы-

кателем тока. По этой причине приоритетами являлись низкая стоимость и простота исполнения разрядника. Многократность его использования не требовалась.

Этим приоритетам соответствует твердотельный разрядник, легко встраиваемый в короткую низкоиндуктивную передающую линию, обладающий высокой электропрочностью, простой и дешевый по сравнению, например, с вакуумным разрядником, предлагавшимся в [3].

Проблема состоит в том, что требование „идеальности“ твердотельного разрядника противоречит требованию простоты, по крайней мере, в случае коммутации токов мегаамперного уровня и выше из-за значительных потерь энергии на активном сопротивлении канала пробоя. Например, в [4] для снижения потерь энергии в канале пробоя предлагалось устанавливать множество параллельных твердотельных разрядников с введением принудительной системы синхронизации их запуска. Но даже это не делает систему коммутации идеальной: в работе [5] исследователи указали на нестабильность пробоя твердых диэлектриков в разрядниках типа [4] по уровню напряжения. Это ведет к временному разбросу пробоев в многоканальной системе и, следовательно, затягивает по времени процесс падения результирующего сопротивления разрядников.

Из сказанного выше следует, что практическая задача состояла в реализации такого режима пробоя твердотельного разрядника, который не требует использования системы принудительного запуска, отличается относительной стабильностью пробоя по уровню напряжения и сопровождается настолько быстрым и глубоким падением сопротивления разрядника, что он ведет себя почти как идеальный коммутатор. Ниже рассматривается метод решения этой задачи для разрядника, работающего в паре с размыкающим ключом индуктивного накопителя.

1. Режим коммутации твердотельного разрядника с задержкой пробоя и его влияние на скорость переключения тока в нагрузку

Процесс электрического пробоя твердого диэлектрика импульсом напряжения можно разделить на две стадии: стадию потери диэлектриком электрической прочности и стадию его разрушения ([7]).

Стадия потери диэлектриком электрической прочности — это стадия формирования разряда, в процессе которой образуется канал пробоя, продвигающийся от одного электрода к другому. Развитие канала начинается с момента достижения напряжением пробивного уровня, т.е. напряжения, при котором максимальная напряженность электрического поля достигает значения электропрочности материала изоляции. Стадия потери диэлектриком электрической прочности завершается в

момент замыкания электродов. Момент замыкания электродов считается моментом срабатывания разрядника (пробоем диэлектрика).

На второй стадии — стадии разрушения диэлектрика — происходит падение сопротивления канала пробоя. Именно эта стадия определяет скорость переключения тока в нагрузку. Добиться повышения скорости и глубины падения сопротивления можно за счет создания электрического перенапряжения на изоляции разрядника к моменту замыкания электродов. Перенапряжение приводит к повышению мощности энерговыделения в пробивном канале, интенсификации разрушающего воздействия пробоя на диэлектрик, расширению канала и повышению температуры образующейся в нем плазмы. Следствием этого является быстрый рост проводимости канала, зависимость которой от температуры в первом приближении можно охарактеризовать выражением (см. [8]):

$$\sigma \approx 1.9 \cdot 10^2 \cdot \frac{T^{\frac{3}{2}} [\text{eV}]}{\ln \Lambda} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1},$$

где σ — проводимость, T — электронная температура, $\ln \Lambda$ — кулоновский логарифм. Чем выше уровень перенапряжения, тем этот эффект выражен сильнее.

Значительного уровня перенапряжения можно достичь, если за время продвижения канала пробоя от одного электрода к другому межэлектродное напряжение существенно повысится. Скорость нарастания этого напряжения при разрыве больших (мультимегаамперных) токов ограничена быстродействием существующих размыкающих ключей, которое относительно невелико ($\sim 0.5\text{--}1 \mu\text{s}$ по сравнению с требуемым значением $\sim 100 \text{ ns}$). Поэтому задача сводится к тому, чтобы добиться снижения скорости развития канала пробоя (т.е. вызвать задержку пробоя) на фоне броска напряжения (его быстрого нарастания), возникающего при разрыве контура.

Известно, что скорость развития канала пробоя в твердых диэлектриках значительно ниже (часто на один-два порядка: см. [7]), когда пробой развивается от катода к аноду, по сравнению с типичным случаем прианодного старта разряда. Такое развитие пробоя происходит (см. [7]) при создании мест локализованного усиления напряженности электрического поля в прикатодной зоне диэлектрика, например, путем выполнения катода в виде одного или ряда игольчатых электродов, внедренных в диэлектрик. Одновременно при таком расположении игольчатых электродов повышается пробивное напряжение на 30–50% по сравнению со случаем, когда они установлены на аноде (см. [7,9]).

Причина падения скорости состоит в том, что в случае прикатодного старта разряда затруднено формирование электронных лавин (механизм ударной ионизации), прокладывающих канал пробоя (см. [7]). Поэтому возникает большая по длительности задержка пробоя относительно момента достижения пробивного напряжения. На возникновение задержки пробоя указывают также

результаты экспериментов, приведенных, например, в работах [10,11]. В соответствии с ними скорость развития разряда с катода для исследованных образцов диэлектриков не превышала скорости звука в материале. Для распространенных технических диэлектриков скорость звука относительно невелика (например, для полиэтилена — $2.48 \text{ mm}/\mu\text{s}$ [12]). Скорость же развития разряда в обратном направлении — с анода — по результатам экспериментов [10] всегда превышала скорость звука. В сильных электрических полях она лежит в диапазоне $10\text{--}2000 \text{ mm}/\mu\text{s}$ ([7,11,13,14]), причем, в соответствии с [10], возрастает с увеличением напряжения и его производной по времени dU/dt и слабо зависит от расстояния между электродами (от толщины диэлектрика).

Помимо создания задержки пробоя, наличие локального усиления электрического поля в прикатодной области разрядника снижает потенциальный барьер для выхода электронов из катода и дополнительно способствует ускоренному и глубокому падению его сопротивления на второй стадии процесса, т.е. после завершения формирования канала пробоя.

Резкое падение сопротивления приводит к формированию в нагрузке быстронарастающего импульса тока, длительность фронта нарастания которого уже не ограничивается снизу длительностью процесса разрыва контура индуктивного накопителя. Причем в предельном случае мгновенного срабатывания разрядника кривая нарастания тока, а, значит, и минимальная длительность фронта, будут определяться соотношением [15]:

$$I_W(t) = I_\infty \cdot \left[1 - \text{Exp} \left\{ - \left(\frac{R_{Sm}}{L_i} + \frac{R_{Sm}}{L_W} \right) \cdot t \right\} \right]. \quad (1)$$

Здесь $I_\infty = I_i \cdot L_i / (L_i + L_W)$ — амплитудное значение тока в нагрузке; $I_W(t)$ — зависимость тока в нагрузке от времени; I_i , R_{Sm} — ток в индуктивном накопителе и сопротивление размыкающего ключа в момент срабатывания разрядника; L_i и L_W — индуктивности накопителя и нагрузки.

Используя выражение (1), нетрудно убедиться, что время нарастания тока до любой заданной величины $I_W < I_\infty$ определяется формулой

$$\tau_f = \frac{L_i L_W}{R_{Sm}(L_i + L_W)} \ln \left(1 - \frac{I_W}{I_\infty} \right)^{-1}. \quad (2)$$

Из нее следует, что всегда возможно подобрать такое соотношение сопротивления размыкателя R_{Sm} и индуктивностей контура, которое обеспечит фронт нарастания тока τ_f в нагрузке на уровне 100 ns и даже менее. Значение R_{Sm} находят путем численного моделирования процесса электровзрыва проводника [16], оптимизируя его параметры, как правило, по уровню максимального напряжения, достигаемого в процессе электровзрыва.

Наличие мест локализованного усиления напряженности электрического поля в прикатодной зоне диэлектрика подавляет, как более сильный фактор, влияние на

пробой случайных неоднородностей, микровключений и загрязнений в материале изоляции. В соответствии с экспериментальными данными, на которые указывается, например, в [6], введение искусственных концентраторов напряженности электрического поля позволяет снизить разброс пробивного напряжения до $2\text{--}6\%$ и тем самым повысить стабильность процесса коммутации индуктивного накопителя на нагрузку, обеспечивая устойчивое проявление эффекта сокращения длительности фронта нарастания тока в нагрузке. Одновременно, как это следует из [6], это способствует формированию многоканального пробоя при условии достаточно быстрого нарастания напряжения на электродах разрядника. При этом в [6] отмечено, что если количество игольчатых электродов более 30, то разброс пробивного напряжения стремится к нижнему краю вышеуказанного диапазона, т.е. к 2% . В условиях экспериментов, проведенных нами на стационарной установке, критерий возникновения многоканального пробоя не выполнялся. Для этого скорость нарастания напряжения на электродах разрядника как минимум должна была превышать $1 \text{ MV}/\mu\text{s}$ (см. там же в [6]), а фактически составляла величину $\sim 0.25 \text{ MV}/\mu\text{s}$. Поэтому имела место одноканальная коммутация. Однако авторы отмечают возможность многоканальной коммутации как сопутствующего положительного эффекта, который может проявиться на источниках большей мощности, что позволит в соответствии с [6] как существенно уменьшить индуктивность разрядного контура, так и увеличить крутизну фронта формируемого импульса.

Таким образом, для того, чтобы вызвать задержку пробоя и повысить за счет этого эффективность обострения импульса тока в нагрузке, необходимо при разрыве контура индуктивного накопителя, во-первых, осуществить пробой изоляции разрядника в режиме локализованного усиления напряженности электрического поля в прикатодной зоне диэлектрика (вызывает задержку пробоя), во-вторых, создать указанную задержку пробоя на фоне броска (быстрого нарастания) межэлектродной разности потенциалов (вызывает перенапряжение).

Чем больший бросок напряжения произойдет за время задержки пробоя, тем больший уровень перенапряжения на изоляции разрядника будет достигнут и тем быстрее и глубже упадет его сопротивление, а фронт нарастания тока в нагрузке приблизится к минимальному значению, определяемому, например, для чисто индуктивной нагрузки формулой (2).

Отметим, что рост уровня перенапряжения по сути означает уменьшение толщины межэлектродной изоляции при фиксированном амплитудном значении напряжения, при котором должен срабатывать разрядник. Заметим также, что в общем случае твердый диэлектрик может быть заменен на жидкий, если он по своим физическим свойствам способен обеспечить достаточную для создания требуемого перенапряжения задержку пробоя.

2. Техническое исполнение твердотельного разрядника, схема подключения и методика прогнозной оценки параметров коммутации

Рис. 1 иллюстрирует техническое исполнение и схему подключения твердотельного разрядника в разрядный контур индуктивного накопителя. Схема отличается от типично применяемой (см., например, [4–6]) только необходимостью строгого соблюдения полярности электродов разрядника.

Твердотельный разрядник G состоит из плоскопараллельных анода 1 и катода 2, разделенных твердым диэлектриком 3. В катод разрядника встроены игольчатые электроды 4, создающие в прикатодной зоне места локализованного усиления электрического поля. При этом конкретное расстояние, на которое выступают игольчатые электроды вглубь диэлектрика, определяется в каждом случае спецификой решаемой задачи.

Индуктивный накопитель энергии L_i запитывают от источника тока Q . В качестве источника тока могут использоваться, в частности, конденсаторные батареи или взрывомагнитные (магнитокумулятивные) генераторы. Затем осуществляется разрыв электрического контура индуктивного накопителя, например, с помощью взрывного или электровзрывного размыкающего ключа $R_S(t)$. При срабатывании размыкающего ключа $R_S(t)$ генерируется импульс напряжения, прикладываемый между электродами 1 и 2 разрядника G с твердотельной изоляцией 3 (в случае, если в начальном состоянии в нагрузке Z_W имеется разрыв, цепь замыкают с помощью дополнительного сопротивления R_E). Происходит пробой разрядника и замыкание индуктивного накопителя на нагрузку.

Из-за наличия элементов локализованного прикатодного усиления электрического поля пробой происходит с задержкой. За время задержки межэлектродная разность потенциалов возрастает по сравнению с уровнем пробивного напряжения U_r (т. е. напряжения старта пробоя)

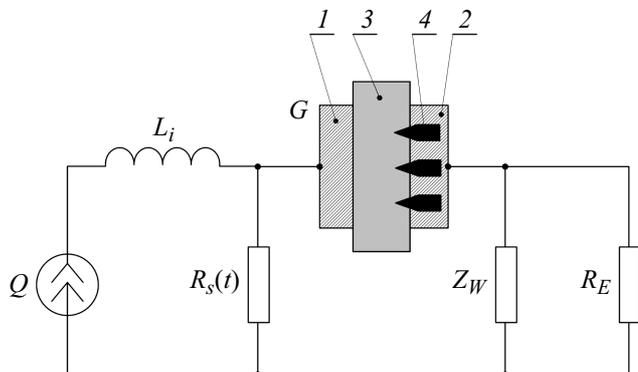


Рис. 1. Техническое исполнение твердотельного разрядника и схема его подключения в разрядный контур индуктивного накопителя. Пояснения в тексте.

на величину $\Delta U_S \approx \langle dU_S/dt \rangle \cdot \tau$, где $\langle dU_S/dt \rangle$ — средняя скорость нарастания напряжения $U_S(t)$, генерируемого при срабатывании размыкающего ключа. В результате к моменту замыкания электродов разрядника напряжение достигает величины $U_G = U_r + \Delta U_S$, т. е. возникает перенапряжение на изоляции разрядника.

В общем случае достигаемый уровень перенапряжений на диэлектрике, момент начала формирования канала пробоя с катода t_r , величину задержки пробоя τ и толщину изоляции h разрядника можно оценить, решив систему уравнений:

$$\begin{cases} U_r(h) = U_S(t_r), \\ \int_{t_r}^{t_r+\tau} v(t) dt = h, \\ U_S(t_r + \tau) = U_{com}. \end{cases} \quad (3)$$

Здесь $U_r(h)$ — зависимость пробивного напряжения от h ; $U_S(t)$ — расчетная зависимость напряжения на разряднике от времени при работе размыкающего ключа на разрыв (ее полагаем заданной); U_{com} — требуемое напряжение коммутации разрядника, лежащее выше уровня, от которого происходит бросок напряжения, но не превышающее максимального напряжения, генерируемого при разрыве контура индуктивного накопителя; $v(t)$ — зависимость продольной скорости приращения длины канала пробоя от времени t .

Первое и третье уравнения в (3) выражают очевидные условия баланса потенциалов на электродах разрядника, второе — описывает развитие канала пробоя.

Приращение напряжения на разряднике над уровнем пробивного определяется равенством

$$\Delta U_S = U_S(t_r + \tau) - U_r(h).$$

Величина U_{com} задается, исходя из результатов расчета процесса формирования импульса тока индуктивного накопителя для схемы, представленной на рис. 1, в предположении „идеальности“ разрядника (коммутация с мгновенным падением его внутреннего сопротивления до нуля). Критерием выбора U_{com} может служить приемлемый уровень потерь энергии при разрыве контура индуктивного накопителя в сочетании с получением желаемого фронта нарастания тока в нагрузке до требуемой величины.

При этом необходимо иметь в виду, что из-за непрерывного нарастания межэлектродного напряжения в течение времени развития канала с катода возможен старт встречного разряда с анода, когда напряженность электрического поля вблизи него превысит уровень электропрочности диэлектрика. Поэтому, вообще говоря, под $v(t)$ следует понимать скорость, которая складывается из встречных скоростей развития каналов пробоя с катода и анода разрядника:

$$v(t) = v_c(t) + v_a(t), \quad (4)$$

причем $v_a(t) = 0$ на начальной стадии развития пробоя (при $t < t_a$, где t_a — момент старта разряда с анода).

На практике $v_c(t)$ и $v_a(t)$ в (4) можно заменить усредненными значениями скоростей, полученными из эксперимента, поскольку установить их точные временные зависимости обычно не представляется возможным. В случае, если в соответствии с [10] можно ожидать, что скорость развития канала пробоя с катода будет близкой к скорости звука, второе уравнение в (3) можно записать в упрощенной форме:

$$v_{cs} \cdot \tau + v_a \cdot (\tau - \Delta t_a(h, U_r(h))) = h, \quad (5)$$

где v_{cs} — скорость звука в материале диэлектрика, $\Delta t_a(h, U_r(h))$ — зависимость времени запаздывания старта встречного пробоя с анода от толщины изоляции h и пробивного напряжения U_r (в соответствии с первым уравнением в (3) напряжение U_r определяет момент старта пробоя t_r).

В случае, когда скорость развития канала пробоя с катода много меньше скорости анодного канала, что, как правило, имеет место на практике, вместо (5) получаем

$$\tau \approx \Delta t_a(H, U_r(h)).$$

Зависимость пробивного напряжения от толщины изоляции $U_r(h)$ устанавливается экспериментально путем тестирования модели разрядника при различных значениях h подачей испытательных импульсов от генератора высокого напряжения с длительностью фронта нарастания, близкой к той, что подается на разрядник при срабатывании размыкающего ключа. Одновременно определяется электропрочность применяемого диэлектрика (предельная напряженность электрического поля, вызывающая пробой материала) в плоскопараллельной геометрии электродов. Затем при различных толщинах h и соответствующих им значениях U_r рассчитывается время запаздывания встречного пробоя с анода Δt_a . Начало пробоя с анода определяется как момент времени, когда в процессе приближения катодного канала пробоя к аноду (или каналов, если формируется многоканальный пробой) и нарастания напряжения $U_S(t)$ на открывающем ключе напряженность электрического поля на аноде достигнет уровня электропрочности диэлектрика. При расчете напряженности электрического поля на аноде потенциал головки канала пробоя, развивающегося с катода, можно полагать равным $U_S(t)$, а ее форму в первом приближении считать полусферической. Радиус канала пробоя на первой стадии его развития по данным, например, [9], можно оценить величиной $R_c \sim 50 \mu\text{m}$.

Найденные вышеуказанным образом зависимости $U_r(h)$ и $\Delta t_a(h, U_r(h))$ позволяют получить замкнутую систему уравнений (3) относительно переменных h , τ , t_r и, следовательно, определить толщину изоляции разрядника h и достигаемый уровень перенапряжения $U_{com}/U_r(h)$ для заданной зависимости напряжения от времени $U_S(t)$ на открывающем ключе.

В силу того что оценки значений R_c , которые можно получить из экспериментальных данных и расчетных

моделей, весьма приближенны из-за значительного разброса характеристик полимеров и отсутствия строгой теории пробоя твердых диэлектриков, радиус R_c желательнее варьировать, чтобы установить степень его влияния на время задержки пробоя.

Зная напряжение коммутации U_{com} и толщину изоляции h , можно произвести окончательный расчет режима формирования импульса тока в нагрузке индуктивного накопителя, связав процесс энерговыделения в канале разрядника, приводящий к разрушению его изоляции, с параметрами разрядного контура (в простейшем случае это можно сделать, например, в приближении каналовой модели электрической дуги [8]).

При проведении прогнозных оценок режима коммутации необходимо учитывать, является ли ожидаемый режим пробоя одноканальным или многоканальным, так как это существенно меняет процесс нарастания напряженности электрического поля вблизи анода (т.е. условия старта встречных каналов разряда) и динамику изменения сопротивления разрядника в процессе пробоя.

Как ранее упоминалось, в соответствии с [6] для возникновения многоканального пробоя необходимо, чтобы скорость нарастания напряжения на диэлектрике удовлетворяла эмпирическому условию $dU/dt \geq 1 \text{ MV}/\mu\text{s}$. При этом, как следует из [10,11], рост производной dU/dt будет приводить к нарастанию скорости продвижения встречных каналов пробоя с анода, но окажет слабое влияние на скорость распространения катодных каналов.

Кроме того, можно ожидать, что скорость развития встречных анодных каналов пробоя всегда будет выше, чем изначально прианодных, поскольку для случая прианодного старта пробоя характерен повышенный темп нарастания прианодной напряженности электрического поля, что эквивалентно росту производной dU/dt . Действительно, поскольку встречный пробой происходит с задержкой по времени, до момента его старта напряженность электрического поля на аноде непрерывно нарастает не только за счет роста напряжения U_S на открывающем ключе, но и вследствие переноса каналами потенциала катода в направлении анода, причем в момент, когда напряженность электрического поля на аноде достигнет пробивного уровня, напряженность поля на всей толщине диэлектрика от анода до катодных каналов будет превышать этот уровень.

3. Схема экспериментов

Предложенный способ коммутации с задержкой пробоя разрядника был проверен в двух экспериментах. Схема экспериментов представлена на рис. 2. В качестве источника тока для запитки индуктивного накопителя L_i электромагнитной энергией использовалась конденсаторная батарея (КБ) емкостью $C = 492 \mu\text{F}$, заряжаемая до напряжения 43 kV. Конденсаторная батарея коммутировалась 12 управляемыми твердотельными разрядника-

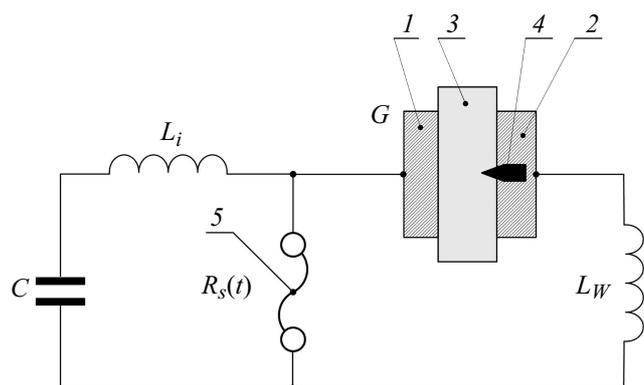


Рис. 2. Схема проведения экспериментов. Пояснения в тексте.

ми того же типа, что в [17], каждый из которых имел по два канала пробоя. Накопитель имел индуктивность $L_i = 100$ нН. Размыкающий ключ представлял собой электровзрывной размыкатель тока $R_s(t)$, выполненный по аналогии с [18] в виде 32-х полосок медной фольги длиной 60 см, общей шириной 32 см и толщиной 15 м, которые помещались в щелевое пространство между двумя полиэтиленовыми изоляторами, заполняемое дугогасящей средой.

Обе сборки изготавливались по единой конструкторской документации, поэтому каких-либо конструктивных отличий не имели. Постановка экспериментов отличалась только условиями электровзрыва фольги вследствие внесения физических различий в свойства дугогасящей среды, окружавшей взрываемый проводник. Поэтому форма импульса напряжения на размыкающем ключе и, как следствие, форма нарастания тока в нагрузке были разными.

В обоих случаях использовался идентичный твердотельный разрядник G , коммутация которого осуществлялась в одноканальном режиме. В качестве диэлектрика, разделявшего электроды, применялся полиэтилен. Полиэтилен был выбран как доступный, технологичный в изготовлении изоляции и обладающий удовлетворительной электропрочностью материал с относительно хорошо известными свойствами. Игольчатые электроды 4 представляли собой цилиндрические стальные стержни диаметром 3 мм, переходящие в конус с углом 36° . Игольчатые электроды впрессовывались в катод 2 и вдавливались в полиэтилен на глубину 2.1 мм. Толщина d диэлектрика 3 между игольчатым электродом 4, установленном на катоде 2, и анодом 1 составляла $d = 0.7$ мм. Индуктивность нагрузки L_w составляла 10 нН.

Экспериментальная сборка имела коаксиальную форму и устанавливалась в центр токосборника с равномерным подводом тока коаксиальными кабелями, подключенными по его периметру. Производные импульсов тока в индуктивном накопителе и в нагрузке измерялись с помощью однопетлевых индуктивных датчиков. На входе индуктивного накопителя устанавливались три

таких датчика с диаметром петли 8 мм на радиусе 127 мм. В радиальной передающей линии нагрузки использовались три датчика с петлей площадью 50 мм², размещавшиеся на радиусе 180 мм. Помимо этого, с помощью активного проволочного сопротивления величиной 330Ω , подключенного на вход индуктивного накопителя, измерялся протекающий по сопротивлению ток с помощью пояса Роговского. Поскольку произведение этого тока на сопротивление дает величину напряжения на входе индуктивного накопителя, это позволяло дополнительно (независимым образом) контролировать характер нарастания напряжения на электровзрывном размыкателе в процессе электровзрыва проводника.

Все измерения проводились с помощью цифровых осциллографов модели LeCroy 24Xs с временным шагом 2 ns. Осциллографы, запускающие их устройства и датчики отрывались от „земли“. Приборы находились на удалении 25 м от места коммутации. Электропитание измерительной аппаратуры осуществлялось от аккумуляторов во избежание значительных наводок на измерительный тракт.

В результате разряда конденсаторной батареи в индуктивный накопитель вводился ток, нарастающий примерно за $3.1 \mu\text{s}$ до 1.23 МА в первом эксперименте и за $3.8 \mu\text{s}$ до 1.19 МА во втором. Затем ток переключался в нагрузку в результате электровзрыва фольги размыкающего ключа и пробоя разрядника. Отметим, что некоторое отличие в разрядных токах установки может быть следствием разброса потерь энергии в ее многоканальной коммутационной системе, которая не обладает идеальной стабильностью, или проявлением влияния электромагнитных наводок на измерительный тракт, от которых невозможно полностью избавиться (незначительные наводки могут создавать заметную погрешность при интегрировании сигнала с индуктивных датчиков).

4. Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 3 приведены полученные в первом и во втором экспериментах кривые импульса напряжения, сформированного электровзрывным размыкателем тока, а на рис. 4 и 5 соответствующие им кривые переключения тока индуктивного накопителя в нагрузку.

Проанализируем представленные результаты.

В соответствии с экспериментальными данными, полученными при исследовании процесса пробоя для ряда твердых диэлектриков Ю.Н. Вершининым [10,11], скорость v_c развития канала пробоя с катода определяется только уровнем напряжения U_r , при котором происходит старт пробоя. При этом установлено, что темп нарастания межэлектродного напряжения dU_s/dt в момент пробоя на эту скорость влияния не оказывает. Принимая

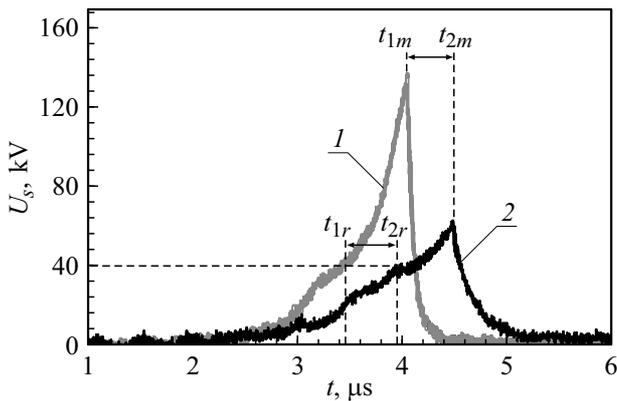


Рис. 3. Кривые импульсов напряжения, сформированные электровзрывным размыкателем тока в экспериментах: 1 — первый эксперимент, 2 — второй эксперимент.

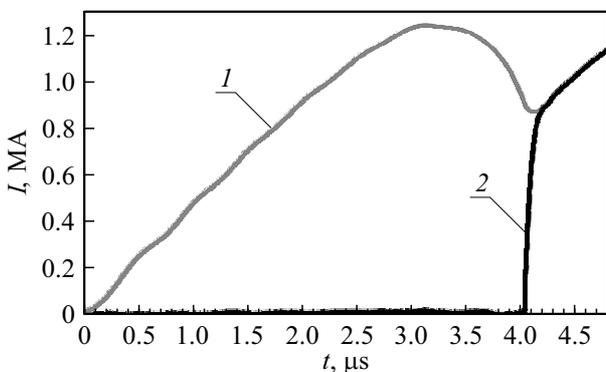


Рис. 4. Кривые переключения тока индуктивного накопителя в нагрузку, полученные в первом эксперименте: 1 — входной ток, 2 — ток нагрузки.

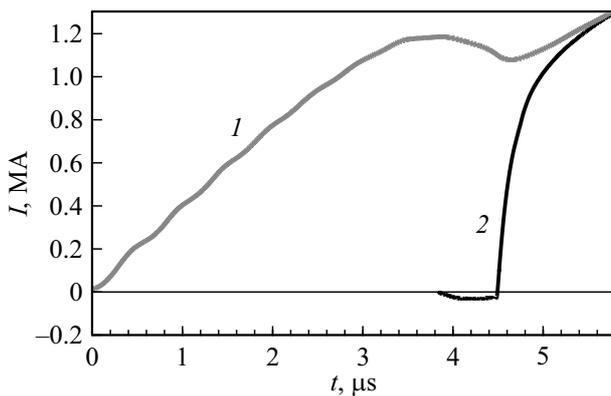


Рис. 5. Кривые переключения тока индуктивного накопителя в нагрузку, полученные во втором эксперименте: 1 — входной ток, 2 — ток нагрузки.

это во внимание, а также то, что в наших экспериментах использовался однотипный равнотолщинный диэлектрик, полагаем, что его пробивное напряжение U_r можно считать одинаковым для каждого из экспериментов (в пределах статистического разброса 2–6%, см. разд. 1).

Отсюда следует равенство стартовых скоростей развития катодных каналов. При равенстве скоростей уровень перенапряжения, достигаемый на изоляции разрядника к моменту его пробоя (замыкания электродов), должен быть тем выше, чем больше скорость нарастания напряжения $U_S(t)$ на размыкающем ключе, что подтверждается сравнением экспериментальных кривых на рис. 3. Поскольку индуктивность нагрузки много меньше индуктивности накопителя $L_W \ll L_i$, замыкание электродов разрядника приводит к резкому падению напряжения на размыкающем ключе. Поэтому уровень перенапряжения можно оценить по отношению амплитудного значения напряжения на размыкающем ключе к пробивному напряжению U_r разрядника. Если полагать, что влияние скорости нарастания напряжения dU_S/dt на задержку пробоя относительно невелико, то временной интервал $\Delta t_m = t_{2m} - t_{1m}$ между пиками напряжений U_{1m} и U_{2m} должен быть примерно равен временному интервалу $\Delta t_r = t_{2r} - t_{1r}$ между моментами достижения пробивного напряжения U_r . Определив по графикам на рис. 3 уровень напряжения, при котором это условие выполняется, находим, что $U_r \approx 40$ kV, а соответствующая ему задержка пробоя составляет $\tau = t_{1m} - t_{1r} \approx t_{2m} - t_{2r} \approx 0.55$ μ s. Учитывая, что $U_{1m} \approx 137$ kV, $U_{2m} \approx 63$ kV, получаем, что в первом эксперименте перенапряжение достигло уровня $U_{1m}/U_r \approx 3.4$, а во втором — $U_{2m}/U_r \approx 1.6$. Напряженность электрического поля, при которой происходил старт пробоя с острия игольчатого электрода, составляла $E_r \approx 470$ kV/mm. А средняя скорость развития канала пробоя с катода при такой задержке не превышала $d/\tau = 0.7/0.55$ mm/ μ s ≈ 1.27 km/s.

Предположим теперь, что с ростом dU_S/dt скорость развития канала пробоя возрастает. При этом старт пробоя при прочих равных условиях по-прежнему происходит при одном и том же напряжении. Тогда, поскольку dU_S/dt в первом эксперименте больше, чем во втором, задержка пробоя в первом эксперименте должна быть меньше, чем во втором: $\tau_1 < \tau_2$. Из графиков на рис. 3 видно, что этому условию соответствует старт пробоя при напряжении $U_{1r} = U_{2r} < 40$ kV, что является следствием неравенства $(dU_S/dt)_1 > (dU_S/dt)_2$. Последнее означает увеличение задержек пробоя τ_1 и τ_2 по сравнению с τ ($\tau_2 > \tau_1 > \tau = 0.55$ μ s) и, как следствие, уменьшение скоростей развития каналов пробоя: $\bar{v}_2 = d/\tau_2 < \bar{v}_1 = d/\tau_1 < d/\tau = \bar{v} = 1.27$ km/s (черта над символами означает усреднение по времени).

Следовательно, средняя скорость распространения пробоя с катода в обоих экспериментах была заведомо меньше скорости звука в полиэтилене, равной 2.48 mm/ μ s, т.е. не превышала границы, указанной Ю.Н. Вершининым.

Из графиков на рис. 4 и 5 следует, что большему уровню перенапряжения соответствует большая скорость нарастания тока в нагрузке. В первом эксперименте фронт нарастания тока до уровня 0.8 MA составил примерно 110 ns, во втором — 270 ns. Процесс коммутации разрядника сопровождался также быстрым нарастанием

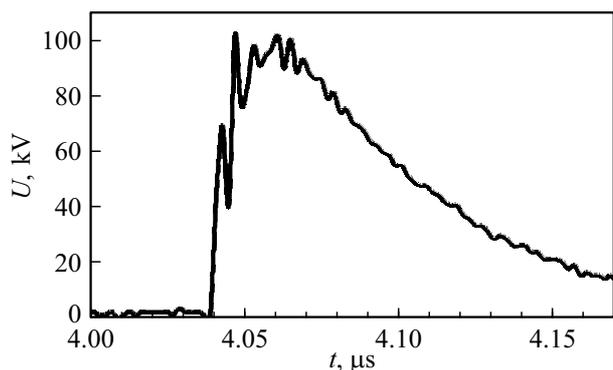


Рис. 6. Импульс напряжения на нагрузке в первом эксперименте.

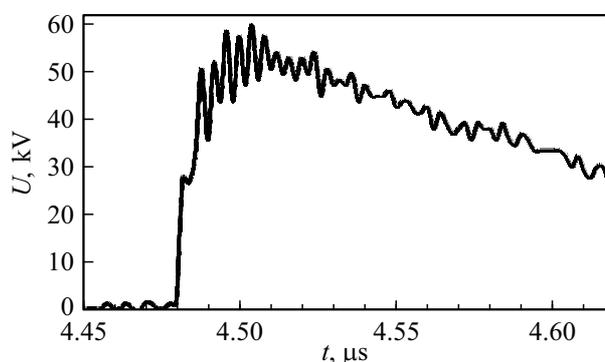


Рис. 7. Импульс напряжения на нагрузке во втором эксперименте.

напряжения на нагрузке. Время нарастания напряжения на нагрузке от нуля до максимального значения составило в первом эксперименте примерно 9 ns, а во втором — 16 ns (рис. 6 и 7).

В итоге экспериментальные результаты, полученные на стационарной установке, подтверждают работоспособность принципа обострения импульса тока индуктивного накопителя, заложенного в работу устройства.

На основании результатов этих экспериментов была оформлена заявка на изобретение и получен патент [19].

Описанные выше эксперименты были выполнены в 2017 и 2018 годах.

В 2019 г. разрядник указанного типа был использован для коммутации на нагрузку индуктивного накопителя, запитываемого от спирального взрывомагнитного генератора, в работе, представленной группой сотрудников РФЯЦ-ВНИИЭФ в публикации [20]. В эксперименте (рис. 1) использовался электровзрывной размыкатель тока, при срабатывании которого генерировался импульс напряжения $U_S(t)$ амплитудой около 600 kV с фронтом нарастания длительностью примерно 1.25 μ s (по уровню 0.1–0.9 от амплитудного значения). Межэлектродная изоляция разрядника была выполнена из полиэтилена. Ее толщина между игольчатыми электродами и анодом составляла 3 mm. Конфигурация игольчатых электродов:

один в центре, шесть — вокруг на радиусе 7 mm. В этом эксперименте в нагрузку индуктивностью 10 nH был сформирован импульс тока, нарастающий до 5 MA за 120 ns. Результаты эксперимента совпали с расчетом в предположении „идеальности“ разрядника.

Заключение

Представленные результаты указывают на перспективность применения твердотельных разрядников (разрядников с конденсированным диэлектриком) с прикатодным локализованным усилением электрического поля, работающих в режиме задержки пробоя в паре с открывающими ключами индуктивных накопителей электромагнитной энергии, для формирования быстро нарастающих импульсов тока в низкоимпедансных нагрузках.

Рассмотренный режим коммутации и техническое решение разрядника допускают возможность переключения токов мультимегаамперного уровня с временем нарастания до 100 ns. Разрядник прост в исполнении и является одноразовым. Поэтому разрядники этого типа могут применяться, например, в выходных каскадах формирования импульса тока взрывомагнитных генераторов, не приводя к существенному усложнению и удорожанию конструкции.

Финансирование работы

Организация, финансировавшая выполнение работы: Госкорпорация РОСАТОМ.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] *Магнито-кумулятивные генераторы — импульсные источники энергии*. Ред. В.А. Демидов, Л.Н. Пляшкевич, В.Д. Селемир (РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, 2019), с. 6–97.
- [2] S.G. Garanin, A.V. Ivanovsky, L.S. Mkhitarian. Nuclear Fusion, **51**, 103010 (2011).
- [3] С.Г. Гаранин, А.В. Ивановский. ПМТФ, **56** (1), 7 (2015).
- [4] H.C. Early, F.J. Martin. Rev. Sci. Instrum., **36** (7), 1000 (1965).
- [5] J.N. DiMarco, L.C. Burkhardt. J. Appl. Phys., **41** (9), 3894 (1970).
- [6] Г.А. Месяц. *Импульсная энергетика и электроника* (Наука, М., 2004)
- [7] Г.А. Воробьев, Ю.П. Похолков, Ю.Д. Королев, В.И. Меркулов. *Физика диэлектриков (область сильных полей)* (ТПУ, Томск, 2003)
- [8] Ю.П. Райзер. *Физика газового разряда* (Наука, М., 1987)
- [9] Б.И. Сажин, А.М. Лобанов, О.С. Романовская, М.П. Эйдельмант, С.Н. Койков. *Электрические свойства полимеров* (Химия, Л., 1977), изд. 2-е, пер.
- [10] Ю.Н. Вершинин. ЖТФ, **59** (2), 158 (1989).

- [11] Ю.Н. Вершинин. *Электронно-тепловые и детонационные процессы при электрическом пробое твердых диэлектриков* (УрО РАН, Екатеринбург, 2000)
- [12] *Физические величины: Справочник*. Ред. И.С. Григорьев, Е.З. Мейлихов (Энергоатомиздат, М., 1991), с. 148.
- [13] И.Ф. Пунанов, Р.В. Емлин, В.Д. Куликов, С.О. Чолах. *ЖТФ*, **84** (4), 35 (2014).
- [14] Р.В. Емлин, В.А. Белоглазов. *Тр. 6-й научной школы „Физика импульсного воздействия на конденсированные среды“* (Николаев, 1993), с. 195.
- [15] Г. Кнопфель. *Сверхсильные импульсные магнитные поля* (Мир, М., 1972), с. 165. [H. Knoepfel. *Pulsed High Magnetic Fields* (North-Holland, Amsterdam, 1970), Ch. 6.]
- [16] В.А. Бурцев, Н.В. Калинин, А.В. Лучинский. *Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках* (Энергоатомиздат, М., 1990)
- [17] А.Б. Андресен, В.А. Бурцев, А.Б. Продунов. *ЖТФ*, **45** (2), 294 (1975).
- [18] V.K. Chernyshev, A.I. Kucherov, A.B. Mezhevov, A.A. Petrukhin, V.V. Vakhrushev. *Electroexplosive foil 500 kV Current Opening Switch Characteristics Research*. Digest of Technical Papers: 11-th IEEE International Pulsed Power Conference. V. II, 1997, P. 1208–1212.
- [19] Изобретение, RU 2 746 052 C1, МПК H01N 39/00, МПК H01N 35/00. „Способ формирования импульса тока в нагрузке индуктивного накопителя электромагнитной энергии“. А.А. Базанов. Приоритет от 10.08.2020. Опубликовано 06.04.2021, Бюл. № 10.
- [20] А.А. Базанов, Е.И. Бочков, С.Г. Гаранин, П.В. Дудай, А.А. Зименков, А.В. Ивановский, К.Н. Климушкин, В.М. Комаров, А.И. Краев, В.Б. Куделькин, В.И. Мамышев, И.В. Морозов С.М. Полюшко, А.Н. Скобелев, З.С. Цибилов, Е.В. Шаповалов. *ДАН*, **489** (4), 355 (2019).