

04;12

Способ реализации импульсной дуги с низким напряжением горения в газе. Исследование влияния параметров цепи

© А.Н. Довбня,¹ К.В. Корытченко,¹ Ю.Я. Волколупов,¹ С.М. Шкирида,² М.А. Красноголовец,¹ В.С. Демин²

¹ Научно-исследовательский комплекс «Ускоритель»,

61108 Харьков, Украина

e-mail: dovbnua@nik.kharkov.ua

² Харьковский институт танковых войск,

61034 Харьков, Украина

e-mail: entropia@rambler.ru

(Поступило в Редакцию 5 февраля 2003 г. В окончательной редакции 25 мая 2003 г.)

Рассматривается способ реализации импульсной дуги в газе, применимый в устройствах, где требуется скоростной высокоэффективный разогрев газовой среды. Проанализированы электрические схемы реализации импульсной дуги. Экспериментально установлена динамика энерговыделения в столбе импульсной дуги, характерная для выбранной схемы разряда. Предложены варианты экспериментальной оценки собственных параметров разрядной цепи. Приведены результаты оценки этих параметров, полученные на имеющейся установке.

Введение

В последние годы большой интерес вызывает вопрос практической реализации устройств, где энергия электрического разряда используется для формирования интенсивных ударных волн. В рамках решения данной задачи изучался способ реализации импульсной дуги, который планируется применять в плазменно-волновой системе формирования интенсивных ударных волн [1].

Требования к организации электрического разряда в плазменно-волновой системе

Специфика реализации разряда в плазменно-волновой системе вызвана требованием быстрого установления квазиравновесного термодинамического состояния газа в положительном столбе импульсной дуги. На основании изучения механизмов пробоя и развития разрядов в газе были выработаны условия реализации разрядов в данном устройстве. Эти условия заключаются в следующем. Высоковольтный импульс напряжения должен обеспечить искровой пробой газонаполненного разрядного промежутка. Дальнейшее развитие разряда должно происходить при низком напряжении на электродах. Мощность источника низкого напряжения должна обеспечить протекание высокого тока до момента достижения квазиравновесного термодинамического состояния газа в разряде. При этом, величина энергии, затраченной на искровой пробой, должна быть как минимум на порядок ниже энергии, выделяющейся в период кратковременного горения дуги. Полагается, что при такой организации разряда за счет изменения величины напряженности электрического поля удается изменить распределение баланса энергии, формируемое в результате электронно-молекулярного взаимодействия

в газовом разряде. При высоком напряжении на электродах обеспечивается интенсивная ионизация молекул газа, при низком значительно возрастает доля энергии, которая передается электронами во вращения молекул и упругие потери [2]. За счет этого происходит увеличение скорости и эффективности преобразования электрической энергии в кинетическую энергию молекул газа.

Кроме достижения квазиравновесного термодинамического состояния газа в разряде, необходимо добиться требуемой скорости энерговыделения в разрядном канале. Ограничение скорости энерговыделения может быть вызвано собственными параметрами элементов цепи.

Применительно к плазменно-волновой системе полная длительность разряда должна составлять не более $5 \cdot 10^{-5}$ s, при этом требуемая величина выделившейся энергии за этот период должна составить не менее 10J. Напряжение на электродах разрядного промежутка в период горения дуги должно незначительно отличаться от напряжения горения стационарных дуг.

Выбор схемы для реализации импульсной дуги в газе с требуемыми параметрами

В случае применения электрических схем, использующих дополнительный поджигающий электрод для предварительной частичной ионизации газа в разрядном промежутке, требуется поддержание на основных электродах напряжения значительно превышающего величину минимального напряжения горения дуги. Это вызвано необходимостью наличия дополнительной разности потенциалов на электродах для формирования основного токопроводящего канала. Кроме того, уменьшение величины этого потенциала приводит к возрастанию времени задержки формирования основного токопроводящего канала или к его срыву. Отдельно следует отметить

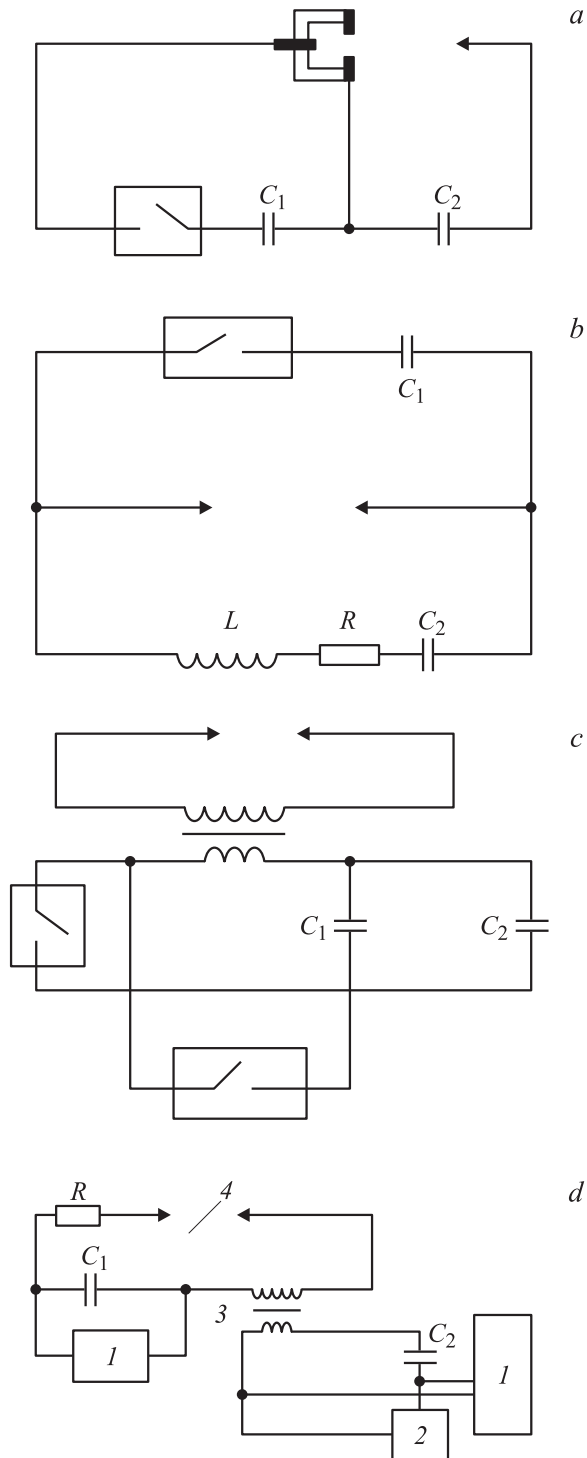


Рис. 1. *a-c* — схема электрического разряда. *d* — схема организации импульсной дуги. *I* — зарядные устройства, *2* — коммутатор, *3* — трансформатор, *4* — разрядный промежуток, *R* — измерительный шунт.

трехэлектродную схему [3], где за счет поджигающего разряда в полузамкнутом объеме формируется направленный поток ионизированного газа, который замыкает основной разрядный промежуток (рис. 1, *a*). Для быстрого формирования направленного потока газа также

требуется скоростной и эффективный разогрев газовой среды, что не позволяет использовать данную схему разряда.

Электрические схемы, где используется параллельное подключение к разрядному промежутку высоковольтного и низковольтного источников напряжения, требуют принятия мер по обеспечению совместной работы источников напряжения (рис. 1, *b*). Для защиты низковольтного источника от импульса высокого напряжения используется последовательное включение в цепь активного или реактивного элементов (например, защитного дросселя). В результате этого не удовлетворяются предъявляемые к данному способу требования или по эффективности или по скорости энерговыделения.

Очевидна неприемлемость использования импульсного трансформатора в случае его непосредственного подключения к разрядному промежутку. Это вызвано сильными отличиями в требованиях к динамике разряда на разных стадиях, что не позволяет технически реализовать трансформатор с такими выходными параметрами (рис. 1, *c*).

В результате анализа различных схем реализации импульсных дуг выбрана как наиболее удовлетворяющая предъявляемым требованиям, электрическая схема (рис. 1, *d*). Такое решение вызвано следующими соображениями. Последовательное включение высоковольтного и низковольтного напряжения позволяют обеспечить непрерывное протекание тока в период разряда, чем сокращается полная его длительность. Схема предусматривает уменьшение реактивной составляющей цепи за счет работы импульсного трансформатора в коммутационном режиме. Этим достигается необходимая скорость энерговыделения.

Экспериментальная часть

Динамика энерговыделения в рассматриваемой схеме электрического разряда. Приведенная электрическая схема была практически реализована (рис. 1, *d*). Импульсный трансформатор позволял получать высоковольтные импульсы напряжения с регулируемой амплитудой до 26 кВ. Напряжение заряда низковольтного конденсатора регулировалось в диапазоне 0–400 В. Такие параметры устройства позволили провести исследование динамики энерговыделения в разрядном промежутке до 3 мм в воздухе при нормальных атмосферных условиях. Применение в качестве низковольтного накопителя электрической энергии конденсатора марки МБГН номиналом 200 мФ позволило получить приведенную динамику разряда (рис. 2).

Анализ динамики энерговыделений показывает, что такая электрическая схема может быть использована в плазменно-волновой системе формирования интенсивных ударных волн.

Из-за нелинейной характеристики нагрузки возникает вопрос о влиянии параметров разрядной цепи на динамику энерговыделения. Варианты исследования этих параметров приведены ниже.

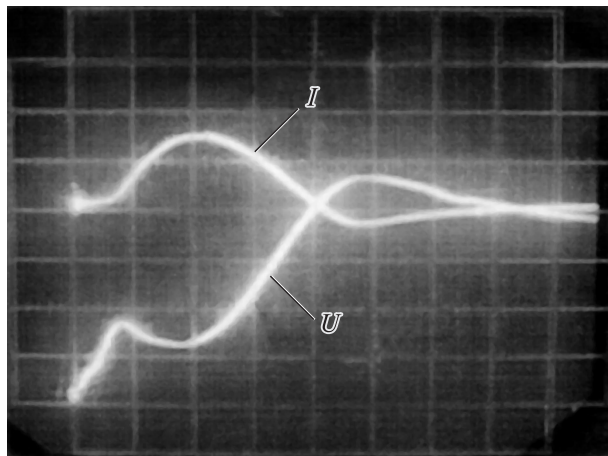


Рис. 2. Оциллограммы тока I и напряжения U . Развертки: скорость — 20 ms/square, I — 1351 A/sq., U — 200 V/sq.

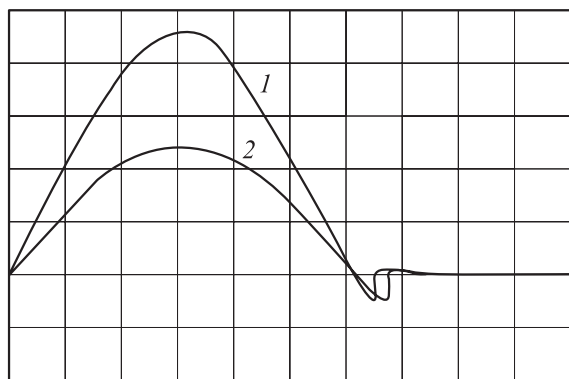


Рис. 3. Оциллограммы тока. Развертки: скорость — 10 ms/sq., I — 270 A/sq., напряжение заряда емкости: 1 — $U_1 = 200$ V, 2 — $U_2 = 100$ V.

Исследование влияния собственной индуктивности емкостного накопителя на динамику разряда. Одним из параметров конденсатора, влияющим на длительность разряда, является его собственная индуктивность. Установить влияние собственной индуктивности реального конденсатора на длительность разряда предлагается путем регистрации динамики развития тока при разряде конденсатора через тиристор и низкоомный шунт.

Выбор типа тиристора осуществляется исходя из максимальных значений напряжения и тока в цепи разряда, величины падения потенциала на катодно-анодном участке (его значение должно быть значительно меньше величины падения потенциала на исследуемом разрядном промежутке). Влиянием нелинейности вольт-амперной характеристики тиристора в случае высокой крутизны нарастания тока можно пренебречь. При этом продолжительность этого периода должна быть как минимум на порядок меньше полной длительности разряда.

Указанный выше конденсатор марки МБГН разряжался через тиристор ТЧИ-100. Напряжение заряда конденсатора регулировалось в диапазоне 0–400 V. Учитывая параметры данного типа тиристора, удалось значительно уменьшить влияние характеристики электронного ключа на динамику энерговыделения.

Путем сравнения кривых развития тока при разряде конденсатора через тиристор и при разряде в схеме организации импульсной дуги возможно выявить влияние собственной индуктивности конденсатора на динамику энерговыделения в данной схеме разряда. В результате анализа выяснилось, что в данном случае собственная индуктивность конденсатора определяет пологую кривую нарастания тока в период горения дуги (рис. 3).

Исследование совместного влияния нелинейных сопротивлений элементов электрической цепи на динамику разряда. Данное исследование проводилось путем включения реле вместо разрядного промежутка в схему организации импульсной дуги. Разрядный контур с емкостью C_2 не использовался. При таком варианте исследования не осуществляется „внешнее“ насыщение сердечника трансформатора, что приводит к искажению реального влияния параметров цепи на динамику разряда. Но этот вариант исследования дает возможность установить максимальную амплитуду тока разряда, которая возможна в данной цепи при заданном начальном напряжении заряда емкости C_1 . Эта оценка позволяет отделить влияние текущего состояния газа в разрядном канале от влияния собственных параметров электрической цепи на динамику энерговыделения в данной схеме разряда.

Предъявляемые требования к реле в этом случае заключаются в обеспечении минимального влияния „дребезжания“ контактов на динамику энерговыделения и их низком сопротивлении. Последнее требует применения реле с большой площадью контактных поверхностей.

В используемом реле полная площадь контактных поверхностей составила 39.25 mm². Результаты динамики развития тока разряда приведены на рис. 4. Следует

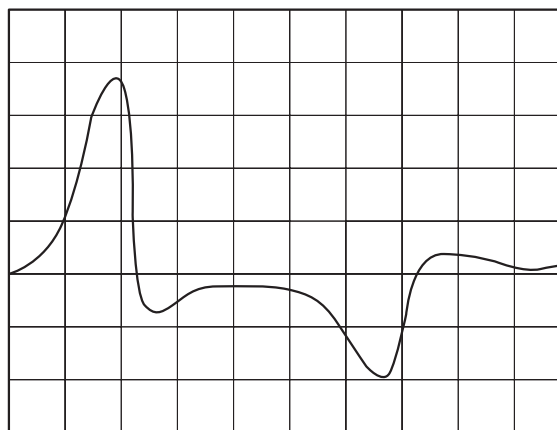


Рис. 4. Оциллограмма тока. Напряжение заряда емкости — 100 V. Развертки: I — 270 A/sq., скорость — 0.1 ms/sq.

отметить, что в случае применения реле возникают проблемы синхронизации с измерительной аппаратурой. Это приводит к возможному сдвигу момента начала развертки. Тем не менее полная картина динамики развития тока оставалась стабильной. Анализ графиков показывает, что в случае отсутствия дополнительного насыщения сердечника трансформатора от постороннего источника тока в цепи разряда возникает колебательный процесс. Это подтверждает нецелесообразность применения схем разряда (рис. 1, *b*). Отсутствие резких выбросов тока говорит о сравнительно малой длительности периода „дребезжания“ контактов. Сравнение графиков тока разряда на разрядный промежуток и через контакты реле показали, что пороговые значения напряжения горения дуги определяются текущим состоянием газа в разрядном канале, а не срывом разрядного тока из-за собственных параметров разрядной цепи. Полученные графики развития тока при разряде на контакты реле позволяют выявить влияние нелинейных сопротивлений элементов электрической цепи на динамику развития тока в схеме организации импульсной дуги.

Выводы

Данная работа позволила оценить электрическую схему, в которой реализуется импульсная дуга с низким напряжением горения. В результате было выявлено, что данная схема может быть использована в плазменно-волновой системе формирования интенсивных ударных волн и в других устройствах, где требуется скоростной высокоэффективный разогрев газовой среды. Предложенные варианты исследования влияния сопротивлений элементов электрической цепи на динамику разряда позволяют экспериментально оценить диапазон применения реального устройства, собранного по данной схеме, или выработать путь изменения его параметров.

Список литературы

- [1] *Корытченко К.В., Волколупов Ю.Я.* и др. // ЖТФ. 2002. Т. 72. Вып. 4. С. 124–125.
- [2] *Райзер Ю.Л.* Физика газового разряда. М.: Наука, 1987. 591 с.
- [3] *Романенко С.А.* Импульсные дуги в газах. М.: Наука, 1968. 195 с.