

ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 537.725.7523

А.Н. Власов, М.В. Дубков, М.А. Буробин, С.В. Жимолоскин, А.Б. Маношкин

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА «ИНГИР-МЕГА-15» ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЙ ИНДУКЦИОННОГО РАЗРЯДА

Создана экспериментальная установка «ИНГИР-Мега-15» для формирования импульсного индукционного разряда и проведения его исследований. Разработаны метод и методика ввода энергии в плазму при быстром спаде сильного магнитного поля. Проведены теоретические оценки, подтверждающие выполнимость технического задания научно-исследовательской работы. Рассмотрены предварительные экспериментальные результаты испытаний установки в тестовом режиме, показавшие её работоспособность и потенциальную возможность формирования долгоживущих плазмоедов.

Ключевые слова: экспериментальная установка «ИНГИР-Мега-15», сильное и быстроспадающее магнитное поле, импульсный индукционный разряд, долгоживущий плазмоед.

Введение. В рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007 – 2013 годы» кафедрой общей и экспериментальной физики Рязанского государственного радиотехнического университета проводится НИР по теме: «Проведение исследований индукционного разряда при быстром спаде сильного магнитного поля в горячей плазме с использованием установки типа «ИНГИР-Мега», имеющей индуктивный накопитель для генерирования индукционного разряда при накачке мегаваттными импульсами». Слово «ИНГИР» образовано по первым буквам слов «индукционный накопитель для генерирования индукционного разряда», приставка «Мега» означает диапазон мощности используемых импульсов накачки. В настоящее время нами разработан технический проект и создаётся первая установка из семейства ИНГИР – «ИНГИР-Мега-15» с мощностью импульса накачки на уровне 15 МВт.

Индукционные методы для ввода энергии в плазму, как известно, основаны на явлении электромагнитной индукции. Среди них большой интерес представляют газовые разряды непосредственно внутри изменяющегося магнитного поля (разряды *H*-типа); буква *H* символизирует

определяющую роль магнитного поля [1]. *H*-разряды могут быть либо высокочастотными, либо импульсными. Последние используются, как правило, для ввода значительных потоков энергии в плазму. В свою очередь, в импульсных *H*-разрядах наибольшая доля энергии может вводиться либо на переднем, либо на заднем фронте импульса накачки. Именно последний из указанных типов разрядов может быть использован для получения долгоживущих плазмоедов [2]. Свойства плазмы мощного *H*-разряда при вводе энергии на заднем фронте импульса накачки являются малоизученными, а техническая реализация такого разряда представляет весьма сложную инженерную задачу. **Цель работы** – оценить реальность достижения параметров создаваемой экспериментальной установки «ИНГИР-Мега-15» и рассмотреть возможность различных её применений.

Описание установки. В состав установки (рисунок 1) входят: 1) силовая система; 2) испытательная камера; 3) сменные газоразрядные стенды; 4) вакуумная аналитическая система; 5) управляющая регистрационно-измерительная система.

1. Силовая система предназначена для создания достаточно больших токов, обеспечивающих необходимый магнитный поток внутри ин-

дуктивного накопителя энергии. Эта система содержит ёмкостный накопитель энергии с зарядным устройством и замыкающее устройство (рисунок 2).



Рисунок 1 - Внешний вид установки «ИНГИР-Мегга-15»

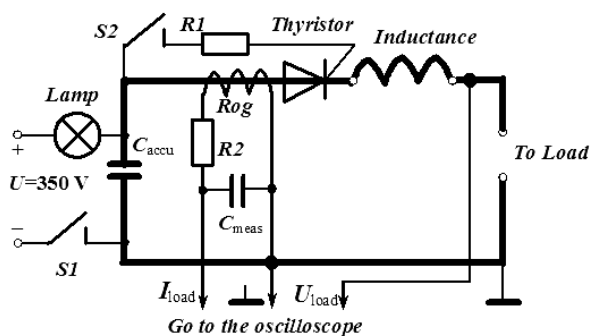


Рисунок 2 – Упрощенная схема силовой системы:

$U=350\text{ V}$ – питающее напряжение 350 В (планируется увеличить до 450 В), *Lamp* – лампа накаливания (95 Вт, 12 шт. в параллель), служащая в качестве балластного сопротивления, ограничивающего ток заряда конденсаторной батареи, *S1* – силовой ключ для заряда батареи, C_{accu} – конденсаторная батарея (0,15 Ф, планируется увеличить до 1 Ф), *Thyristor* – блок быстродействующих тиристоров (общий ударный ток 35 кА), *S2* – силовой ключ для запуска тиристоров, *R1* – ограничительное сопротивление, *Rog* – пояс Роговского, *R2* и C_{meas} – интегрирующая цепочка, *Inductance* – индуктивность, подбираемая для условий эксперимента, *To Load* – к нагрузке, I_{load} – сигнал тока нагрузки, U_{load} – измеряемое напряжение нагрузки, *Go to the oscilloscope* – к осциллографу

2. Испытательная камера предназначена для размещения сменного газоразрядного стенда и различных датчиков (рисунок 3).



Рисунок 3 – Внешний вид испытательной камеры с установленным в ней газоразрядным стендом

3. Сменный газоразрядный стенд имеет в своём составе индуктивный накопитель энергии, газоразрядную камеру и прерыватель тока. Этот стенд предназначен для формирования индукционного разряда при быстром спаде сильного магнитного поля. Сменный газоразрядный стенд может иметь различные конструктивные особенности. Внешний вид стенда с цилиндрической разрядной камерой показан на рисунке 3 (внутри испытательной камеры).

4. Вакуумная аналитическая система имеет вакуумные насосы и снабжена масс-спектрометром типа «трёхмерная ионная ловушка». Она предназначена для экспериментирования индукционными разрядами при пониженном давлении, а также для анализа продуктов плазмохимических (и, возможно, ядерных) реакций. Внешний вид системы приведен на рисунке 4.



Рисунок 4 - Внешний вид вакуумной аналитической системы (компьютер не вошел в кадр)

5. Управляющая регистрационно-измерительная система предназначена для управления процессами экспериментов и для измерений параметров процессов, сопровождающих индукци-

онный газовый разряд. Она включает командный блок, видеокамеры, в том числе с повышенной частотой кадров, имеет различные датчики и пятиканальную систему регистрации на основе осциллографических приставок, подключенных к персональным компьютерам.

Установка работает следующим образом.

После заряда конденсаторной батареи (рисунк 2) и готовности регистрационно-измерительной управляющей системы подаётся команда на включение блока быстродействующих тиристоров, в результате чего на нагрузку поступает импульс напряжения, который приводит к возникновению соответствующего импульса тока. Амплитуда и фронты этого импульса тока определяются характеристиками цепи газоразрядного стэнда и внутренним сопротивлением и индуктивностью разрядного контура силовой системы (около 2 мОм и 1 мкГн).

Технические требования. Требования к номенклатуре параметров экспериментальной установки ИНГИР-Мега-15 следующие:

- 1) объём газоразрядной камеры, встроенной в индуктивный накопитель энергии, см³.....90;
- 2) максимальная индукция магнитного поля в камере, Тл.....13;
- 3) количество ампер-витков катушки индуктивного накопителя энергии.....1000000;
- 4) максимальная мощность в импульсе разрядного тока, МВт.....15;
- 5) максимальное напряжение конденсаторной батареи, В.....450;
- 6) ёмкость конденсаторной батареи, мкФ.....250000;
- 7) максимальный ток в импульсе накачки, кА.....35;
- 8) максимальная длительность импульса накачки, мс.....0,5;
- 9) длительность заднего фронта, мкс.....50;
- 10) минимальный период следования импульсов, с.....600.

Теоретическая часть. Проведём ориентировочные оценки достижимости и правильности выбора указанных параметров.

1. Газоразрядная камера может быть выполнена в двух конструкторских исполнениях – в виде цилиндра и в виде тора. При цилиндрической форме камеры её размеры можно оценить на основании следующих очевидных соотношений:

$$B = \mu_0 IN / l, \quad (1)$$

$$V = \pi D^2 l / 4, \quad (2)$$

где V – заданный объём камеры ($90 \cdot 10^{-6}$ м³), D – диаметр камеры, l – её длина, B – заданное значение индукции магнитного поля (13 Тл),

μ_0 – магнитная постоянная, IN – заданное значение ампер-витков ($1 \cdot 10^6$).

На основе соотношений (1) и (2) имеем:

$$l = \mu_0 IN / B = \mu_0 \cdot 10^6 / 13 \approx 0,097 \text{ м},$$

$$D = \sqrt{4V / (\pi l)} = \sqrt{4 \cdot 90 \cdot 10^{-6} / (\pi \cdot 0,097)} \approx 0,0344 \text{ м}.$$

Рассмотрим тороидальную камеру. В этом случае необходимо учесть полученное в [2] ограничение по соотношению малого r и большого R радиусов тора: $r/R = 1/3$. Учитывая, что объём тора равен $V = 2\pi^2 Rr^2$, имеем:

$$R = \sqrt[3]{9V / (2\pi^2)} = \sqrt[3]{9 \cdot 90 \cdot 10^{-6} / (2\pi^2)} \approx 0,034 \text{ м}.$$

Соответственно $r \approx 0,011$ м.

Следует отметить, что в тороидальной камере при заданном объёме и заданном числе ампервитков импульс индукции будет меньше 13 Тл, что вполне допустимо, так как в этом случае определяющим фактором является величина импульса первичного тока (1000000 ампер-витков), обеспечивающая ожидаемое время жизни плазмоида (более 3с) [2].

2. В тороидальной камере на основании (1) индукция 13 Тл может быть получена при числе ампер-витков:

$$IN = 2\pi RB / \mu_0 = 2\pi \cdot 0,034 \cdot 13 / \mu_0 \approx 2,2 \cdot 10^6 \text{ А}.$$

Возможность и необходимость достижения такой величины будут определены в процессе выполнения НИР.

3. Заданное количество ампер-витков может быть обеспечено при числе витков индуктивного накопителя:

$$N = IN / I_m, \quad (3)$$

где I_m – максимальный ток в импульсе накачки.

Из (3) получаем: $N = 1 \cdot 10^6 / 35 \cdot 10^3 \approx 29$.

4. Максимальная мощность в импульсе разрядного тока в предположении активной нагрузки и достаточно быстрого нарастания тока ориентировочно может быть оценена по формуле: $(dW/dt)_{\max} = I_m \cdot U_c = 35 \cdot 10^3 \cdot 450 \approx 15,75 \cdot 10^6$ Вт. Здесь U_c – напряжение на конденсаторной батарее.

5. Максимальное напряжение конденсаторной батареи принято равным $U_c = 450$ В и определяется номенклатурой выпускаемых электролитических конденсаторов.

6. Достаточность ёмкости конденсаторной батареи (250000 мкФ) можно оценить на основании формул:

$$\delta U_c = \frac{1}{C_0} \int I dt, \quad (4)$$

$$I = I_m t / \tau. \quad (5)$$

Здесь δ – относительное изменение напряжения на конденсаторной батарее, C – её ёмкость, τ – длительность импульса (0,5 мс), при этом формула (5) предполагает линейное изменение разрядного тока с пологим передним и резким задним фронтами. Из (4) и (5) следует:

$$\delta = I_m \tau / (2CU_c). \quad (6)$$

Для нашего случая согласно (6) имеем: $\delta = 35 \cdot 10^3 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} / (2 \cdot 0,25 \cdot 450) \approx 0,08$. Это вполне приемлемая величина, что свидетельствует о правильности выбранного значения ёмкости конденсаторной батареи.

7. Максимальный ток в импульсе накачки (35 кА) определяется в нашем случае элементной базой – конкретно – суммарным ударным током используемых тиристоров (ТБ261-125-10 [4], 10 шт. в параллель).

8. Максимальная длительность импульса накачки (0,5 мс) выбрана на основании имеющейся практики [3] и может варьироваться в процессе экспериментов, при этом должна учитываться формула (6) так, чтобы параметр $\delta \leq 0,2$.

9. Длительность заднего фронта t_b (50 мкс) задаётся приблизительным соотношением:

$$\frac{U_c}{U_b} = \frac{t_b}{\tau}, \quad (7)$$

где U_b – напряжение на прерывателе тока. Как следует из (7), в нашем случае прерыватель тока должен выдерживать напряжение $U_b = U_c \tau / t_b = 450 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} / 50 \cdot 10^{-6} \approx 4500$ В.

Это при токах 35 кА представляет сложную техническую задачу, и в техническом задании предусмотрена возможность корректировки данного параметра.

10. Минимальный период t_c следования импульсов (600 с) определяется возможностью зарядного устройства. Зарядный ток I_c без учёта токов утечек конденсаторов задаётся приблизительным соотношением:

$$U_c = \frac{1}{C} \int_0^{t_c} I_c dt. \quad (8)$$

На основании (8) для рассматриваемого нами случая зарядный ток должен быть не менее величины $I_c = U_c C / t_c = 450 \cdot 0,25 / 600 \approx 0,2$ А. Это технически несложно обеспечить.

Метод и методика исследований. Суть разрабатываемого метода состоит в том, что при достаточных величинах амплитуды индукции импульса магнитного поля и скорости спада этого поля в горячей плазме возникает индукционный разряд, который может сформировать ус-

тойчивую магнитогидродинамическую (МГД) конфигурацию [2].

Суть методики проведения исследований состоит в том, что на газоразрядный стенд от конденсаторной батареи с большой ёмкостью и весьма малым внутренним сопротивлением подаётся импульс напряжения, в результате чего в газоразрядном стенде в зависимости от его конструкции, содержащей прерыватель тока, происходит формирование плазменного сгустка внутри сильного магнитного поля, которое быстро спадает. В качестве источника горячей плазмы внутри индуктивного накопителя в газоразрядном стенде удобно использовать электрический взрыв металла, покрытого органической плёнкой. В качестве активного элемента прерывателя тока также удобно использовать взрывающуюся проволочку, но без органического покрытия.

Данная методика является наиболее доступной для проведения исследований индукционно-го разряда.

Экспериментальные исследования. Ограничимся рассмотрением экспериментов в тестовом режиме с газоразрядным стендом, показанным на рисунке 3. В данном случае эксперименты проводились с наложением сильного и быстроспадающего магнитного поля на разрядную камеру с взрывающейся проволочкой. Роль прерывателя тока выполняла сама взрывающаяся проволочка, так как она была включена последовательно с катушкой, рисунок 5.

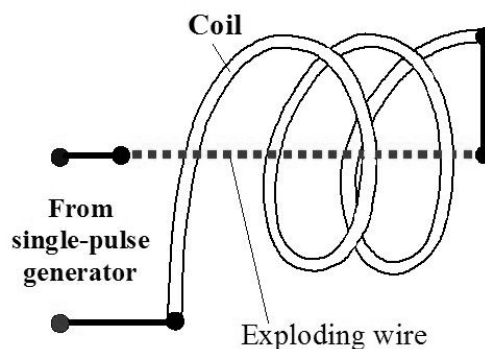


Рисунок 5 – Взрывающаяся проволочка (Exploding wire) внутри камеры с наложением внешнего сильного и быстроспадающего магнитного поля: coil – катушка, From single-pulse generator – с генератора импульса

Расположение взрывающейся проволочки внутри разрядной камеры показано на рисунке 6.

Осциллограмма тока и напряжения на индукторе, формирующего индукционный разряд, приведена на рисунке 7.

В результате действия индукционного разряда формировались долгоживущие плазменные сгустки, рисунок 8.

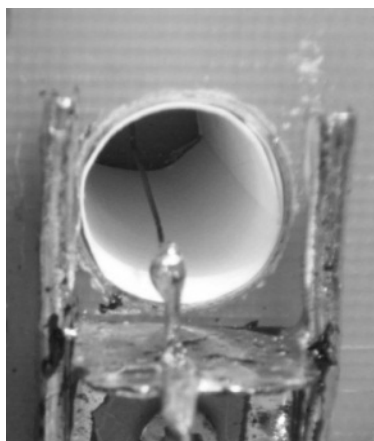


Рисунок 6 – Взрывающаяся проволока внутри цилиндрической разрядной камеры

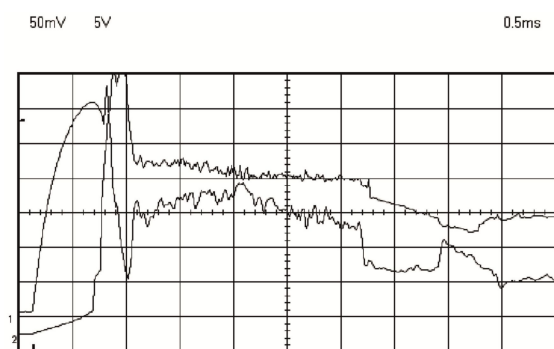


Рисунок 7 – Осциллограмма: 1 – ток (0,33 кА/дел), 2 – напряжение (50 В/дел)



Рисунок 8 – Видеокادر плазменных сгустков на 108 мс процесса

Экспериментальные результаты чётко показывают на существенное влияние сильного и быстроспадающего магнитного поля на процесс ввода энергии в плазму (при электровзрыве подобных проводников без магнитного поля время жизни получаемых плазменных сгустков было на порядок меньше). Формирование долгоживущих плазменных сгустков свидетельствует о повышении внутренней энергии плазмы и образовании в плазме, вероятно, вихревых структур.

Основной критерий оценки получаемых результатов – величина времени жизни формируемых плазменных сгустков – плазмоидов. Если это время будет составлять 3 и более секунд, то это с большой степенью вероятности будет свидетельствовать о наличии токового слоя в горячей плазме с прогнозируемыми характеристиками [2]. В данном случае следует проводить работы в направлении управляемого синтеза, двигаясь по пути укрупнения установок.

В случае же, если время жизни получаемых плазмоидов будет меньше 3 секунд, то использование исследуемого индукционного разряда для целей управляемого синтеза следует признать неперспективным, поскольку невозможно с уверенностью говорить о наличии долгоживущего токового слоя с ультрарелятивистскими электронами. До 3 секунд время жизни плазменных сгустков вполне может быть обеспечено химическими реакциями. Тогда установка может быть использована для альтернативных применений.

О возможных применениях созданной установки. На основе исследований, обзора литературы, патентных исследований и обобщений, проведенных на первом этапе НИР, можно сделать вывод о том, что полученные промежуточные результаты могут быть использованы для развития следующих научных направлений.

1. Управляемый синтез. Это основное направление исследований в данной НИР. Главные надежды здесь связаны с экспериментальным получением долгоживущего плазменного сгустка (со временем жизни 3 секунды и более). Такой сгусток горячей плазмы, как ожидается, может быть получен после модернизации установки, когда станет возможным преодолеть порог (первый порог) формирования долгоживущей устойчивой МГД конфигурации при атмосферном давлении [2]. В этом случае можно говорить о принципиальной возможности формирования тороидального токового слоя, что в дальнейшем позволит использовать этот слой для целей управляемого синтеза [5].

2. Исследование воздействия интенсивных потоков энергии на вещество. Здесь открываются широкие возможности для получения новых результатов как до, так и после преодоления пороговых мощностей импульса накачки в установках типа «ИНГИР».

3. Исследование плазмохимических реакций. Здесь, возможно, открываются широкие перспективы, связанные с тем, что получаемая плазма, в сущности, является гетерогенной, что, конечно же, может способствовать получению уникальных химических соединений. Кроме то-

го, создаваемая техника, не исключено, может оказаться эффективной для очистки промышленных и бытовых отходов.

4. Исследования электрического взрыва металла. Здесь необычность ситуации связана с воздействием на взрывающийся проводник весьма сильного импульса внешнего магнитного поля, что сильно влияет на проводимость металла.

5. Формирование ионного потока для масс-спектрометрии. Здесь могут открыться привлекательные возможности для создания особо прецизионных масс-спектрометров.

6. Исследования воздействия сильных импульсов магнитного поля с резким задним фронтом на биологические объекты. Не исключено, что в этом научном направлении могут быть получены весьма неожиданные и интересные результаты.

Заключение. Таким образом, как показали проведенные теоретические оценки, все рассмотренные выше требования технического задания НИР физически реализуемы. Проведенные предварительные испытания подтвердили работоспособность установки. Не исключено, что, кроме вышеуказанных применений, возможны и другие применения разрабатываемой техники.

Работа поддержана Министерством Образования и Науки РФ, государственный контракт № 14.518.11.7002 от 19 июля 2012 г.

Библиографический список

1. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. Научное издание / Райзер Ю.П. – 3-е изд. перераб. и доп. – Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2009. – 736 с.

2. Власов А.Н. Индукционный разряд для получения долгоживущих плазмодов // Вестник РГРТУ. № 1 (выпуск 39). Часть 2. – Рязань. – 2012. – С.108-121.

3. Колотилин Б.И., Колесников С.А. Расчёт параметров установки для получения плазмодов при электровзрывах свёрнутых в тор проволочных спиралей // Вестник РГРТУ. Вып.21. – Рязань. – 2007. – С.65-68.

4. Григорьев О.П., Замятин В.Я., Кондратьев Б.В., Пожидаев С.Л. Тиристоры: справочник. М.: Радио и связь, 1990. – 272 с.: (Массовая радиобиблиотека; Вып. 1155).

5. Власов А.Н. Тороидальный токовый слой, поддерживаемый в равновесии давлением наружного газа, и внутренняя инжекция быстрых ионов // Тезисы докладов XXXIX Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС. – М.: ЗАО НТЦ «ПЛАЗМАИОФАН», 2012. – С. 43.

УДК 621.387.322

В.А. Коротченко, Э.И. Соколовский, В.И. Соловьев, Ж.В. Солотенкова

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ, ПРЕДШЕСТВУЮЩИХ ПЕРЕРЫВАНИЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА ГЕРКОНОМ С УПРАВЛЯЮЩЕЙ КАТУШКОЙ

Экспериментально подтверждена возможность образования жидкометаллических мостиков в малогабаритном герконе МКА-14108 с пермаллоевыми контактами при разрыве электрического тока в паспортном диапазоне. Показано, что при наибольшем разрываемом токе 500 мА плавление металла начинается приблизительно за 10 мкс до размыкания контактов. С уменьшением тока этот временной интервал сокращается. Установлено, что плавление металла независимо от разрываемого тока начинается при напряжении между контактами около 0,6 В, что соответствует литературным данным. Показано, что напряжение на контактах в момент разрыва тока не зависит от его величины в диапазоне (100 – 500) мА и равно (1,25 – 1,35) В.

Ключевые слова: размыкание магнитоуправляемых контактов, электрическое притяжение, автоэлектронная эмиссия, движение контактных деталей.

Введение. Одной из основных причин эрозии магнитоуправляемых контактов принято считать образование жидкометаллических мостиков при размыкании тока более 1 – 10 мА [1].

Однако количественные данные, подтверждающие возможность формирования мостиков в массовых малогабаритных герконах с длиной баллона до 20 мм при паспортных значениях то-

ка, в литературе не представлены. Имеются лишь ориентировочные сведения для сравнительно больших контактов из платины и серебра (которые не используются в герконах) и для значительных (свыше 1 А) токов [2]. Отсутствие данных затрудняет достоверную оценку влияния мостиковой эрозии на ресурс герконов и разработку мероприятий по его увеличению.

Целью настоящей работы явилось получение экспериментальных данных о процессах, предшествующих прерыванию тока малогабаритным герконом с управляющей катушкой.

Методика экспериментов. Объект исследования – геркон МКА-14108 с длиной баллона 14 мм, с максимальной коммутируемой мощностью 10 Вт, током – до 0,5 А и напряжением – до 100 В. Прибор имеет высокую чувствительность (МДС срабатывания 8 – 35 А при межконтактном зазоре 30 – 40 мкм) и малое время отпущения (до 0,4 мс). Контакты исследуемого геркона изготовлены из пермаллоя (50 % Fe, 50 % Ni) без защитного покрытия.

Исследовались временные зависимости напряжения между контактами геркона, разрываемого тока и тока разряда управляющей катушки. Схема испытаний представлена на рисунке 1.

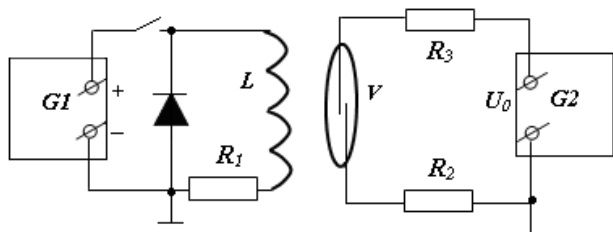


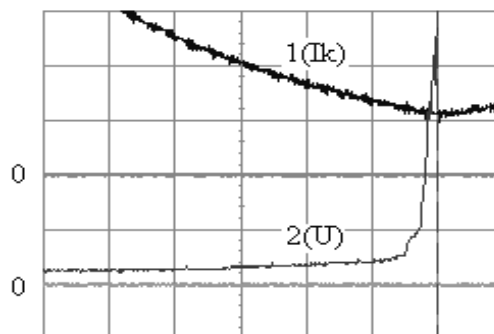
Рисунок 1 – Схема испытаний: $G1$, $G2$ – источники постоянного напряжения, L – управляющая катушка, V – исследуемый геркон, R_1 и R_2 – токовые шунты, R_3 – ограничительное сопротивление

В начальном состоянии ток управляющей катушки (10 мА) соответствовал рабочей МДС срабатывания геркона. Катушка отключалась от источника питания $G1$ через несколько секунд, чтобы исключить влияние механических колебаний контактов, возникающих после замыкания. Катушка разряжалась через диод и собственное активное сопротивление 870 Ом. При уменьшении тока до величины, соответствующей МДС отпущения, геркон размыкался.

Изменения напряжения на герконе, тока геркона и тока катушки после её отключения от источника питания наблюдались с помощью цифрового запоминающего осциллографа АСК-3106. Развертка осциллографа запускалась фронтом напряжения на герконе после разрыва тока. Для получения информации о процессах, пред-

шествующих разрыву, использовалась способность осциллографа запоминать входные сигналы в течение заданного промежутка времени перед запуском развертки.

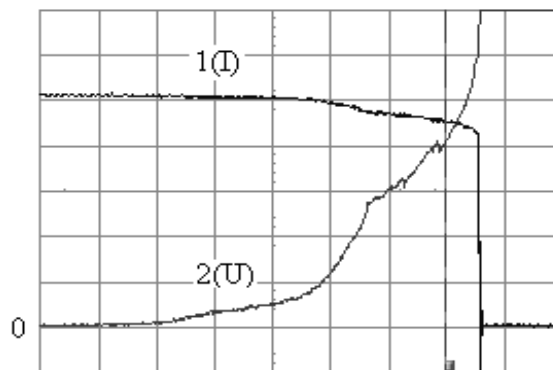
Экспериментальные результаты и их обсуждение. Типичные осциллограммы тока управляющей катушки и напряжения на герконе при коммутируемом токе 500 мА и напряжении источника 75 В представлены на рисунке 2.



**Рисунок 2 – Осциллограммы тока катушки (1) и напряжения на герконе (2) при коммутируемом токе 500 мА и напряжении источника – 75 В.
Цена делений: 1 мА; 0,2 В; 50 мкс**

Видно, что по мере уменьшения тока катушки от 3 мА до 1 мА за время около 200 мкс напряжение сравнительно медленно (от 50 до 100 мВ) увеличивается. Причиной этого является уменьшение площади контактирующих поверхностей в результате ослабления прижимающей силы. Скорость роста напряжения резко увеличивается за 25 мкс до размыкания контактов, которое проявляется в увеличении напряжения до 1 В и в переходе падающего участка зависимости тока катушки от времени в возрастающий. Последнее связано с уменьшением индуктивности катушки за счет разрыва магнитной цепи.

Более детально рост напряжения на герконе и соответствующий спад коммутируемого тока показаны на рисунке 3.



**Рисунок 3 – Осциллограммы тока геркона (1) и напряжения на нём (2) при напряжении источника 7,5 В.
Цена делений: 10 мА; 0,2 В; 2 мкс**

Осциллограммы получены при меньших значениях тока (50 мА) и напряжения источника (7,5 В) с большей скоростью развертки (2 мкс на деление). Уменьшение тока на порядок привело к соответствующему снижению напряжения на замкнутых контактах. Кривые роста напряжения и спада тока перед размыканием геркона хорошо согласуются качественно и количественно: росту напряжения на 0,8 В за 1 мкс до размыкания соответствуют уменьшение тока на 5 мА и падение напряжения на резисторе 150 Ом.

Как следует из рисунка 3, напряжение с течением времени до 9 мкс сравнительно медленно увеличивается до 0,15 В (первая стадия), далее быстро (за 2 мкс) возрастает до 0,55 В (вторая стадия), а затем скорость роста падает практически до нулевого значения и снова резко (до 1,4 В за 4 мкс) возрастает (третья стадия).

Такой характер изменения напряжения качественно объясняется следующим образом [3]. На первой стадии проявляется рост сопротивления из-за уменьшения контактного нажатия (при уменьшении степени деформации микровыступов уменьшается площадь их контактирования или число контактирующих участков). На второй стадии сопротивление увеличивается в результате разогрева зоны контактирования.

Начало третьей стадии связывается с плавлением металла в этой зоне. Характер изменения напряжения на герконе при этом определяется не только ростом удельного сопротивления, но и изменениями (флуктуациями) площади контактирования расплавленной зоны под действием силы, сжимающей контакты. Увеличение площади существенно уменьшает скорость нарастания напряжения, а в ряде случаев обуславливает его заметное снижение (рисунок 4).

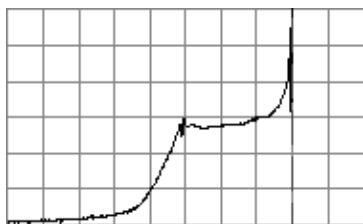


Рисунок 4 – Осциллограмма напряжения на герконе при напряжении источника 10 В и токе геркона 10 мА. Цена делений: 0,2 В; 2 мкс

В некоторый момент времени третьей стадии магнитная сила, сжимающая контакты, становится меньше упругой. Начинает формироваться и вытягиваться по мере расхождения контактов жидкометаллический мостик. Конец стадии объясняется его разрывом. Напряжение в начале третьей стадии называют напряжением плавления замкнутых контактов, которое явля-

ется физическим параметром контактирующих материалов [2]. Его значение равно 0,6 В для железа и 0,65 В – для никеля. Контакты геркона изготовлены из пермаллоя (50 % Fe, 50 % Ni) без защитного покрытия. Экспериментальное значение 0,55 В близко к литературным данным.

Напряжение в конце третьей стадии называют мостиковым напряжением при разрыве тока, которое приблизительно равно напряжению кипения металла 1 – 2 В [2]. Экспериментальное значение 1,4 В также соответствует литературным данным.

С целью проверки достоверности изложенного объяснения в применении к исследуемому объекту были получены осциллограммы напряжения на герконе перед его размыканием для ряда значений коммутируемого тока в диапазоне от 7 мА до 500 мА (рисунок 5).

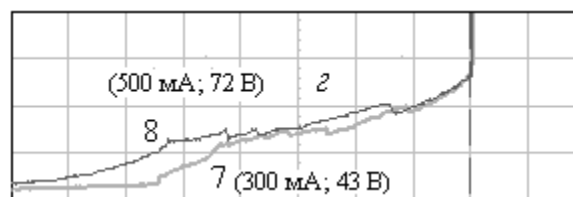
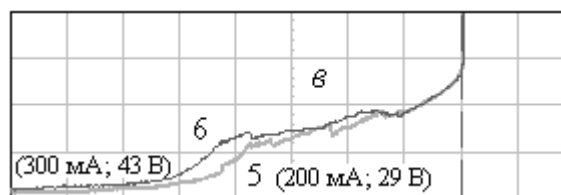
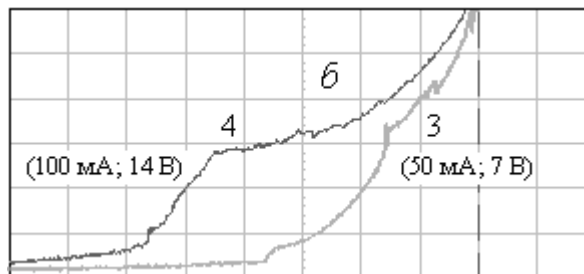
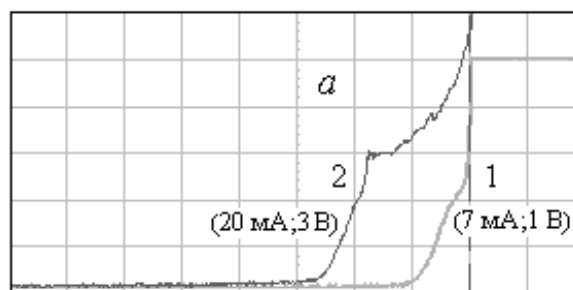


Рисунок 5 – Нарастание напряжения перед размыканием контактов при различных коммутируемых токах и напряжениях источника. Величина ограничительного сопротивления - 150 Ом. Цена делений: 0,2 В (а, б); 0,5 В (в, г); 2 мкс

На осциллограммах четко прослеживается наличие трех обозначенных выше стадий роста напряжения (медленно – быстро – медленно и быстро). Основным выводом из анализа осциллограмм: длительность третьей стадии, предшествующей размыканию контактов, увеличивается с ростом коммутируемого тока (примерно от 4 мкс до 11 мкс при увеличении тока от 20 мА до 500 мА). Закономерность соответствует изложенному выше объяснению процесса роста напряжения, поскольку с увеличением тока зона контактирования должна разогреваться и плавиться раньше при более высоких значениях прижимающей силы. Соответствие подтверждается и тем, что при малом (7 мА) токе третья стадия практически исчезает (кривая 1 на рисунке 5, а), то есть зона контактирования не плавится и жидкометаллический мостик не образуется.

Из рисунка 5 следует, что напряжение на герконе в момент размыкания контактов (конец третьей стадии) при увеличении коммутируемого тока от 100 мА до 500 мА практически не изменяется и находится в диапазоне (1,25 – 1,35) В (рисунк 6). Это подтверждает правомерность теории разогрева контактной зоны, основанной на постоянстве отношения электропроводности и теплопроводности металлов [2].

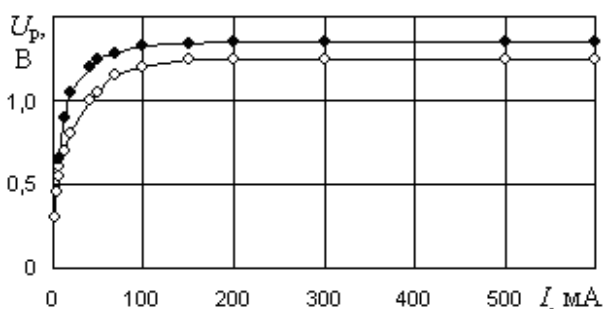


Рисунок 6 – Зависимости напряжения размыкания контактов от коммутируемого тока. Верхняя и нижняя кривые соответствуют минимальным и максимальным значениям из 5 измерений

Более низкие значения напряжения при малых токах, вероятно, соответствуют разрыву мостика без интенсивного испарения.

При проведении экспериментов обнаружилась большая нестабильность результатов: наличие значительного разброса длительностей всех стадий процесса от размыкания к размыканию при одинаковой величине коммутируемого тока. На приведенных осциллограммах это проявилось, например, в том, что длительность третьей стадии при токе 50 мА (кривая 3 на рисунке 5, б) оказалась меньше, чем при токе 20 мА (кривая 2 на рисунке 5, а). Небольшое расхождение наблюдается между кривыми 6 и 7. Проявлялись случаи существенного (в 2 раза) изменения дли-

тельности третьей стадии при нескольких последовательных включениях-выключениях геркона.

Причиной нестабильности, на наш взгляд, является изменение состояния контактирующих поверхностей после каждой коммутации в результате плавления и деформации наиболее выступающих неровностей. В таких условиях следует ожидать, что после каждого включения геркона контакты размыкаются в различных областях перекрытия, имеющих различный микро-рельеф поверхностей.

При повторном снятии осциллограмм для одного и того же образца геркона в одном и том же режиме длительность процесса, предшествующего размыканию контактов, как правило, уменьшается (кривые роста напряжения сдвигаются вправо), однако если затем геркон замыкался в бестоковом режиме, то кривые резко сдвигаются влево (рисунк 7).

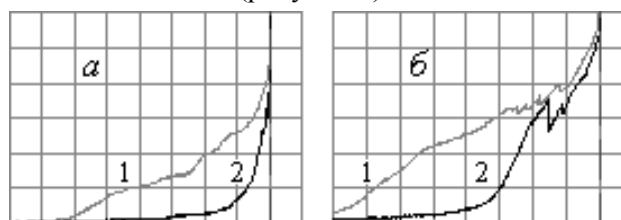


Рисунок 7 – Нарастание напряжения перед размыканием контактов после пяти предшествующих срабатываний в холостом режиме (1) и при напряжении 100 В (2). Коммутируемый ток 10 мА (а) и 50 мА (б). Цена делений: 0,2 В; 2 мкс

Уменьшение длительности процесса, предшествующего размыканию, свидетельствует об уменьшении величины контактного сопротивления, что обусловлено, надо полагать, увеличением площади непосредственного контактирования. При холостых срабатываниях в отсутствие токопрохождения свойства поверхности зоны контактирования изменяются в сторону увеличения сопротивления. Такая тенденция в характере изменений свойств поверхности от срабатывания к срабатыванию согласуется с результатами испытаний на безотказность в процессе длительной работы герконов МКА-14108, не подверженных какой-либо предварительной обработке [5]. При коммутации токов более 10 мА и напряжений более 5 В сопротивление герконов по мере увеличения числа срабатываний уменьшается. При меньших значениях токов и напряжений, особенно в микроамперном и милливольтовом диапазонах, сопротивление значительно возрастает.

Заключение. В работе экспериментально подтверждена возможность образования жидкометаллических мостиков в малогабаритном герконе МКА-14108 с пермаллоевыми контактами

при разрыве электрического тока в паспортном диапазоне в условиях, когда стандартная управляющая катушка разряжается через собственное сопротивление.

Показано, что при наибольшем разрываемом токе 500 мА плавление металла в контактной зоне начинается приблизительно за 10 мкс до размыкания контактов. С уменьшением тока этот временной интервал сокращается, а при значениях тока меньше 10 мА контакты размыкаются без образования мостиков.

Установлено, что плавление металла в контактной зоне начинается при напряжении между контактами около 0,6 В независимо от величины разрываемого тока, что соответствует литературным значениям напряжения плавления для железа (0,6 В) и никеля (0,65 В) [2], входящих в состав пермаллоя. Показано, что напряжение на контактах в момент разрыва тока не зависит от его величины в диапазоне (100 – 500) мА и равно (1,25 – 1,35) В, что соответствует литературным значениям мостикового напряжения при разрыве (железо – 1,22 В, никель – 1,02 В) [4].

Полученные количественные данные целесообразно использовать для расчета динамики повышения температуры в контактной зоне пе-

ред разрывом тока и определения характерных размеров жидкометаллических мостиков.

Библиографический список

1. *Карabanов С.М., Майзельс Р.М., Шоффа В.Н.* Магнитоуправляемые контакты (герконы) и изделия на их основе: монография / под ред. д.т.н., профессора В.Н. Шоффы. Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2011. 408 с.
2. *Хольм Р.* Электрические контакты / Пер. с англ. под ред. д.т.н., проф. Д. Э. Брускина и д.х.м. А.А. Рудницкого. М.: ИИЛ, 1961. 464 с.
3. *Holm R.*, Electric Contacts, Springer, Berlin, 1967. [Цитировано по: Дж. Кобайн, Г. Эккер, Дж. Фаррелл, А. Гринвуд. Вакуумные дуги / под ред. Дж. Лафферти. М.: Мир, 1982. 428 с.]
4. *Раховский В.И.* Физические основы, коммутации электрического тока в вакууме. М.: Наука, главная редакция физико-математической литературы, 1970. 536 с.
5. *Зельцер И.А., Арушанов К.А., Карabanов С.М., Майзельс Р.М., Моос Е.Н.* Новый метод модификации магнитоуправляемых контактов // Сборник трудов третьей международной научно-практической конференции «Магнитоуправляемые контакты (герконы) и изделия на их основе». 27-30 сентября 2011 г. / под ред. д.т.н. С.М. Карabanова – Рязань: ОАО «РЗМКП», 2011. С. 161 – 183.