© А.С. Залогин, Э.Г. Коган,
О.Б. Малкович, 2006

УДК 621.372

А.С. Залогин, Э.Г. Коган, О.Б. Малкович

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ ЗАМЫКАНИЯ ЕМКОСТНЫХ ЦЕПЕЙ

Исследования разрядов замыкания проводились с использованием запоминающего осциллографа С8-13. Для исключения влияния сопротивления соединительных проводов конденсатор присоединялся непосредственно к конструкции искрообразующего механизма, рекомендованному МЭК [1], одним концом непосредственно, а вторым – через измерительный резистор. В качестве последнего использовался шунт амперметра сопротивлением 0,03 Ом. Несмотря на принятые меры, достоверных данных при измерении достичь не удалось, т. к., во-первых, принципиально невозможно из-мерить ток без применения измерительного резистора, а наличие его в схеме искажает электрический разряд, и, во-вторых, индуктивность измерительного резистора, принимая во внимание большие величины токов разряда, вызывает колебания э. д. с. самоиндукции, что снижает точность измерений. Поэтому результаты исследований характеризуют качественную сторону наблюдаемых процессов.

При замыкании емкостной электрической цепи возникновение электрического разряда возможно в следующих случаях:

1. По мере сближения контактов пробоя межконтактного промежутка не происходит. В момент соприкосновения контактов плотность тока недостаточно велика и не приводит к расплавлению металла контактов в точках соприкосновения.

В этом случае или не происходит разряда при замыкании цепи, или, если скорость сближения контактов достаточно велика, то разряд возникает при отскакивании контакта.

2. При сближении контактов происходит пробой межконтактного промежутка. При наличии емкости в цепи такие разряды могут быть опаснее разрядов размыкания, так как в момент пробоя, при максимальном расстоянии между контактами в разряде выделится большая часть энергии, запасенной в емкости. В то же время, при индуктивном или безреактивном характере цепи разряды замыкания менее опасны, чем разряды размыкания, так как последние будут иметь большую длительность и выделят в разряд больше энергии.

3. При сближении контактов пробоя межконтактного промежутка не происходит, однако, при соприкосновении контактов плотность тока в точках соприкосновения вызывает расплавление и испарение материала контактов и разряд возникает в межконтактном промежутке, насыщенном парами металла. Такие разряды возникают при коротком замыкании емкостных цепей.

Электрические разряды, возникающие при дребезге контактов во время их замыкания, рассмотрены в [2]. Для исследования воспламеняющей способности этих разрядов разработано специальное устройство [3].

Рассмотрим электрические разряды, возникающие при пробое межконтактного промежутка при уменьшении расстояния между контактами, когда в качестве электродов используется кадмий и вольфрам. Определим зависимость напряжения, про-

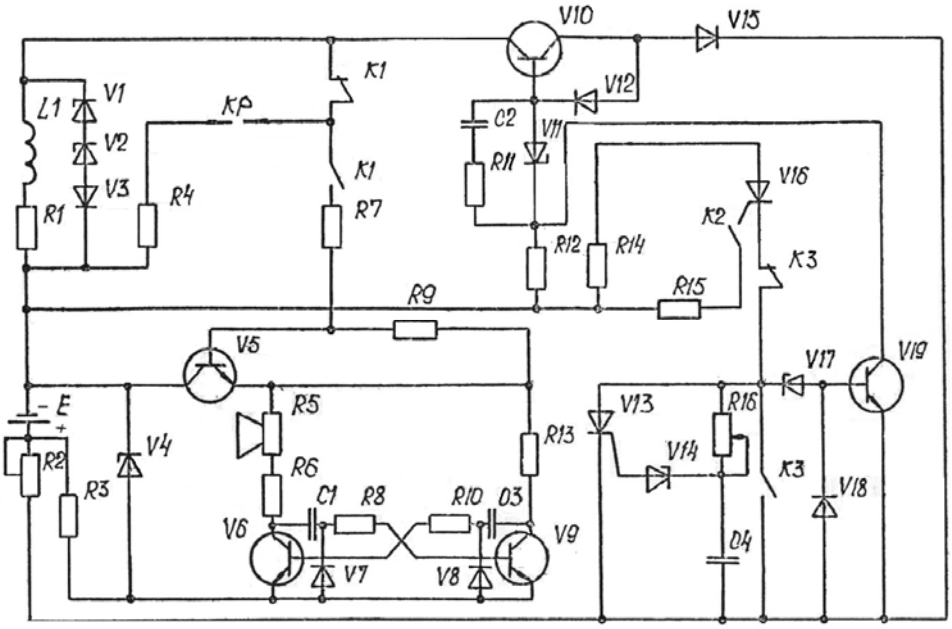

Рис. 1. Схема устройства для исследования разрядов

бивающего межконтактный промежуток, от расстояния между контактами. Для определения этой зависимости разработано специальное устройство, схема которого приведена на рис. 1.

Устройство состоит из источника питания Е, последовательно с которым включена индуктивность, шунтированная стабилитронами V1, V2 и диодом, и транзисторный ключ V10. Этот транзисторный ключ управляется транзистором V19, который в свою очередь управляется тиристором V13. Последовательно в цепь источника включен ограничительный резистор R2, задающий требуемый ток исследуемого разряда. Для задания требуемого расстояния (от 1 мкм до 100 мкм) используются два микрометра. На одном из них закрепляется вольфрамовая проволочка, а на другом кадмиевый диск. Переключающий контакт KI служит для отключения регулируемого контакта КР от исследуемой цепи и подключения к последовательному транзисторному ключу V5, который при замкнутом контакте КР подает питания на мультивибратор на транзисторах V6, V9. При наличии питания на мультивибраторе излучатель сигнализирует о том, что контакт КР замкнут, т.е. расстояние между контактами равно нулю. В процессе разведения контактов КР сигнал излучателя прерывается и с этого момента с помощью одного из микрометров устанавливается требуемое расстояние между контактами.

Устройство работает следующим образом. В исходном состоянии через индуктивность *L* и транзистор V10 от источника Е протекает ток, величина которого определяется резистором R2.

При замыкании контакта К2 включается тиристор V16, через который происходит заряд емкости С4 до напряжения стабилизации стабилитрона V14. Время заряда этой емкости задается с помощью резистора RI6. После достижения напряжения на емкости указанного напряжения открывается стабилитрон V14 и тиристор V13 включается. Это приводит к тому, что закрывается транзистор V19, который от-

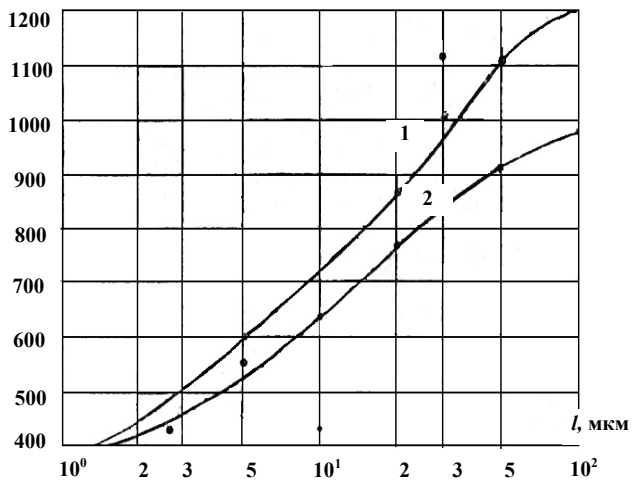

Рис. 2. Зависимости напряжения пробоя от расстояния между контактами при токе 1 А: *1* – катод-кадмий; *2* – катод-вольфрам

крылся при включении тиристора V16. Открытый транзистор V19 шунтирует база-эмиттерный переход транзистора V10 и закрывает этот транзистор. Так как запирание транзистора V10 эквивалентно введению в цепь источника питания и индуктивности большого сопротивления (сотни кОм), на индуктивности возникает э.д.с. самоиндукции, которая прикладывается к контакту с регулируемым расстоянием (КР). При достижении напряжения, достаточного для пробоя межконтактного промежутка, возникает электрический разряд. Таким образом, автоматически достигается пробойное напряжение для установленного расстояния между контактами. Длительность разряда равна времени заряда емкости, т.е. времени, в течение которого транзистор находится в открытом состоянии. Длительность разряда необходимо регулировать в связи с тем, что при большом токе разряда выделяется значительная энергия и происходит выгорание кадмиевого контакта. Это выгорание приводит к увеличению расстояния между контактами в процессе развития разряда и не позволяет установить зависимость пробойного напряжения от расстояния между контактами.

Зависимости величины напряжения пробоя от расстояния между контактами приведены на рис. 2.

Кривая *1* этого рисунка получена для случая, когда катодом служил кадмиевый диск, а кривая *2* - вольфрамовая проволочка. Ток в исследуемой цепи (коммутируемой транзистором V10) был равен 1 А. Напряжение пробоя в случае, когда катодом служил кадмиевый диск, на 10-19 % больше, чем напряжение пробоя в случае, когда катодом являлась вольфрамовая проволочка. Однако в обоих случаях при минимальных исследуемых расстояниях (порядка 0,5 мкм), напряжение пробоя было не ниже 400 В. Поэтому разряды такого типа не является характерными для искробезопасных цепей, где, как правило, применяются напряжения, не превышающие десятков вольт, а используемые индуктивные элементы снабжены искрогасящими шунтами.

Проведены исследования влияния коммутируемого тока и расстояния между контактами на падение напряжения на дуговом разряде после пробоя межконтактного промежутка. На рис. 3 приведены зависимости напряжения на разряде от расстояния между контактами.

Из них следует, что при коммутации тока 0,5 А (кривая 1) с увеличением расстояния между контактами увеличивается и напряжение на разряде (с 14 В до 37 В). При коммутации тока 1 А напряжение на разряде остается постоянным (11 В) во всем исследуемом расстоянии между контактами. Вероятно, это вызвано тем, что с увеличением тока увеличивается насыщение расстояния между контактами парами

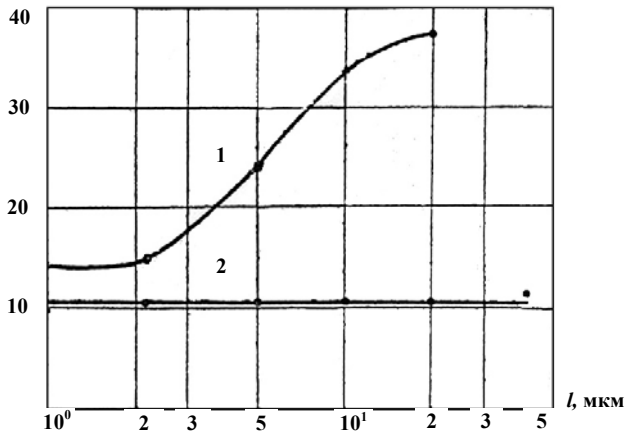

Рис. 3. Зависимость напряжения пробоя на дуговом разряде от его длины: *1* – I = 0,5 А; *2* – I = 1 А

металла. При уменьшении коммутируемого тока до 0,25 А дуговые разряды вообще не возникали, а возникали многопробойные искровые, т. к. для возникновения и поддержания дуги коммутируемый ток был мал. Поскольку размыкание цепи сопровождается испарением токопроводящих мостиков, то это также свидетельствует о том, что пары металла оказывают существенное влияние на параметры разряда.

Рассмотрим коммутацию цепи в случае, когда при соприкосновении контактов кратковременно протекают большие токи, которые могут привести к интенсивному испарению материала контактов, что наблюдается при коротком замыкании емкостных цепей.

Характерные зависимости изменения тока и напряжения на разряде при коротком замыкании источника питания с напряжением U = 24 В с параллельно подключенным конденсатором, приведены на рис. 4.

В результате исследований установено следующее:

- разряд замыкания начинается непосредственно после соприкосновения контактов, причем в начальный момент ток резко возрастает, а напряжение на коммутируемых контактах при этом незначительно отличается от максимального значения напряжения на конденсаторе;

- длительность разряда зависит от емкости конденсатора и составляет 2–3 мкс при емкости 0,1 мкФ; при увеличении емкости на порядок длительность разряда увеличивается примерно в два раза;

- от напряжения на конденсаторе и тока короткого замыкания источника питания длительность разряда не зависит;

- время достижения максимального тока разряда не зависит от напряжения, емкости и тока короткого замыкания источника и равно приблизительно 0,5 мкс;

- максимальная величина тока разряда зависит только от напряжения на конденсаторе и составляет величину порядка 700 А при напряжении 24 В и более 3000 А при напряжении 50 В;

- напряжение прекращения разряда (остаточное напряжение на конденсаторе) зависит от напряжения на конденсаторе и от его емкости: при напряжении 24 В независимо от емкости конденсатора разряд прекращается при напряжении 6–10 В; при напряжении более 40 В конденсатор малой емкости разряжается до нуля, а при увеличении емкости остаточное напряжение на конденсаторе снова становится равным 6–10 В. Влияния тока короткого замыкания источника питания на параметры разряда не установлено.

Полученные результаты могут быть объяснены следующим образом. При соприкосновении контактов возникает ток разряда, вызывающий интенсивное испарение металла контактов и образование межконтактного промежутка. Ионизация межконтактного промежутка обусловлена парами металла и лавинообразным увели-

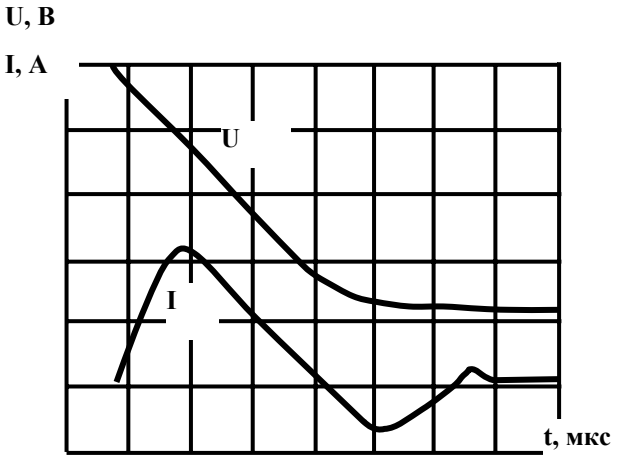

Рис. 4. Характерные осциллограммы разрядов замыкания емкостных цепей: U = 24 В, $I_{кз}$= 1 А. Масштабы: напряжеиия – 5 В/дел, ток – 333 А/дел, время – 0,5 мкс/дел

чением тока. При малых напряжениях разряд прекращается при снижении напряжения на конденсаторе до величины, равной минимальному напряжению дуги U_o = 6 … 10 В.

При увеличении напряжения на конденсаторе и соответствующем увеличении тока (интенсивности испарения материала контактов), пары металла перекрывают межконтактный промежуток, энергия конденсатора полностью выделяется в разряд и напряжение прекращения разряда ниже Uo. При увеличении емкости конденсатора максимальное значение тока (степень испарения материала контакта в момент замыкания) остается такой же, а величина выделяемой в разряде энергии и длительность разряда увеличивается. Испарение металла во время развития разряда приводит к увеличению расстояния между контактами и прекращению разряда при остаточном напряжении на конденсаторе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 51330.4-99 (МЭК 60079-3-90). «Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 3. Искрообразующие механизмы для испытаний электрических цепей на искробезопасность».

2. *Разумихин М.А.* Эрозионная устойчивость маломощных контактов. - М.: Энергия, 1964. 80 стр.

3. А.С. № 1377410, Б.И. №10, 1988. Устройство для исследования электрических разрядов. Э.Г. Коган, В.П. Диденко, А.З. Куфман и А.А. Сафин.

Коротко об авторах

Залогин А.С. – кандидат технических наук, исполнительный директор,
Коган Э.Г. – кандидат технических наук,
Малкович О.Б. – инженер,

Некоммерческая автономная организация «Центр по сертификации взрывозащищенного и рудничного электрооборудования (ЦСВЭ)».

© А.С. Залогин, О.Б. Малкович, 2006

УДК 621.372

А.С. Залогин, О.Б. Малкович

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОСПЛАМЕНЯЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ РАЗРЯДОВ ПРИ КОММУТАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ РЕАЛЬНЫМИ КОНТАКТАМИ

Согласно существующей методике оценки искробезопасности цепь считается искробезопасной, если номинальный ток цепи в 1,5 раза меньше тока, воспламеняющего газовую смесь с вероятностью 10^{-3}. Уменьшение тока в полтора раза приводит к уменьшению вероятности воспламенения на четыре-пять порядков. Следовательно, сравнив воспламеняющие токи, полученные при коммутации цепи искрообразующим механизмом, рекомендованный МЭК [1, 2, 3], и реальными контактами, можно определить вероятность воспламенения газовой смеси при коммутации искробезопасной цепи реальными контактами.

Исследования воспламеняющей способности разрядов проводились при коммутации индуктивной и безреактивной цепи замыкающими и размыкающими контактами реле РЭС 32. Состав газовой смеси – 20 % водорода, остальное воздух. На рис. 1 приведены зависимости вероятности воспламенения от коммутируемого тока безреактивной цепи напряжением 30 В. Как следует из приведенных зависимостей, газовая смесь не воспламенялась током 2,5 А при коммутации цепи размыкающим контактом и током 2 А - замыкающим.

При коммутации этой же цепи искрообразующим механизмом, рекомендованным МЭК, газовая смесь воспламенялась с вероятностью 10-3 при токе 160 мА. Таким образом, воспламеняющий ток безреактивной цепи при коммутации контактами реле увеличился более чем на порядок. Примерно на двадцать процентов отличаются воспламеняющие токи при коммутации замыкающими и размыкающими контактами. Очевидно, что отличие воспламеняющих токов при коммутации замыкающими и размы-

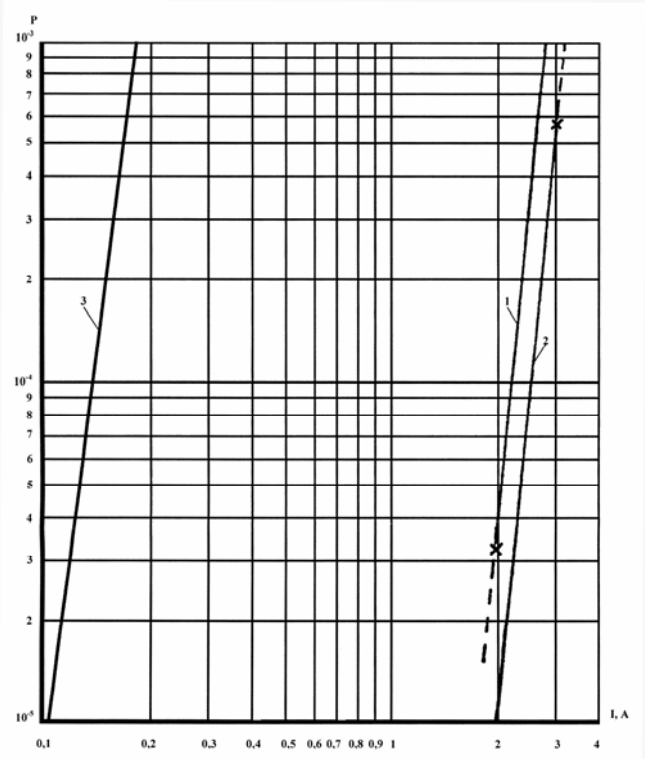

Рис. 1. Зависимость вероятности воспламенения от тока безреактивной цепи, протекающего через контакты реле: *1* - размыкающий контакт; *2* - замыкающий контакт; *3* — искоообоазуюший механизм МЭК

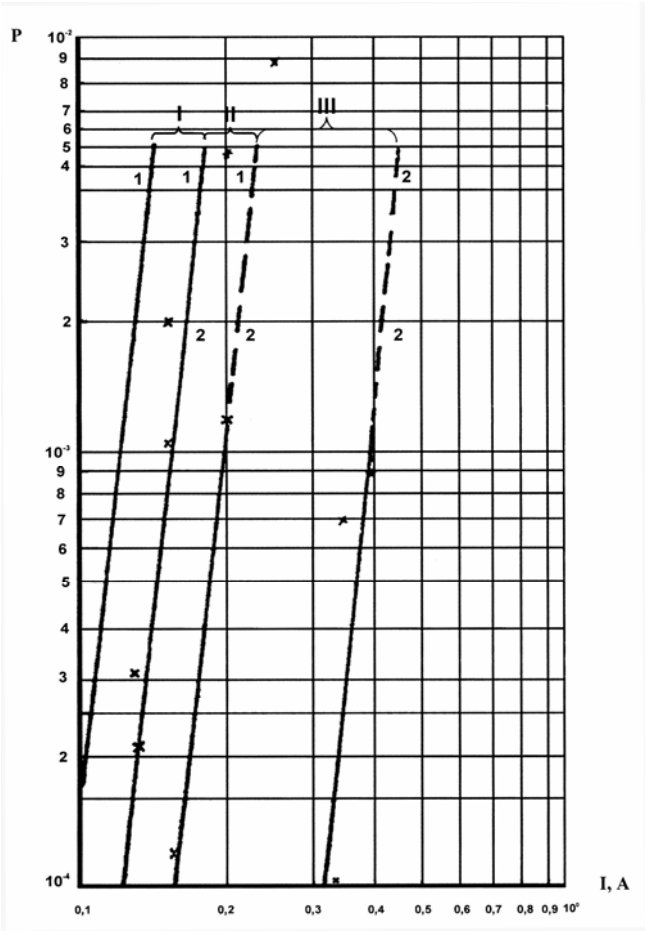

Рис. 2. Зависимость вероятности воспламенения от тока и индуктивности цепи, коммутируемой контактами реле 1 - L = 200 мГн; II-L = 100 мГн; III-L = 10 мГн: *1* - замыкающий контакт; *2* - размыкающий контакт

кающими контактами обусловлено различными скоростями движения контактов. Отличие воспламеняющих токов, полученных при коммутации цепи контактами искрообразующего механизма, рекомендованного МЭК, и реальными контактами обусловлено как различием скорости, так и формой контактов.

На рис. 2 приведены зависимости вероятности воспламенения от тока при значениях индуктивности 10 мГн, 100 мГн и 200 мГн. Следует отметить, что при коммутации индуктивной цепи величина воспламеняющего тока больше зависит от вида коммутирующего контакта, чем при коммутации безреактивной цепи. Это можно объяснить тем, что в индуктивной цепи величина энергии, выделяемой в разряде, практически не зависит от скорости, а потери энергии в контактах уменьшаются с увеличением скорости. При коммутации безреактивной цепи увеличение скорости одновременно приводит к уменьшению выделяемой в разряде энергии и уменьшению потерь энергии в контактах.

На рис. 3 приведены зависимости тока индуктивной цепи, при ком-мутации которой не воспламеняется газовая смесь, от величины индуктивности. Эти зависимости приведены для замыкающего и размыкающего контактов реле. На этом рисунке приведена также зависимость тока от индуктивности, воспламеняющего газовую смесь с вероятностью 10^{-3} при коммутации цепи искрообразующим механизмом, рекомендованным МЭК.

Как видно из приведенных зависимостей, и при размыкании индуктивных цепей воспламеняющие токи при коммутации искрообразующим механизмом, рекомендованным МЭК, в несколько раз меньше, чем при коммутации реальными контактами.

Следовательно, вероятность воспламенения газовой смеси при коммутации цепи контактами реле РЭС-32 на пять-шесть порядков меньше, чем при коммутации этой же цепи контактами искрообразующего механизма, рекомендован-

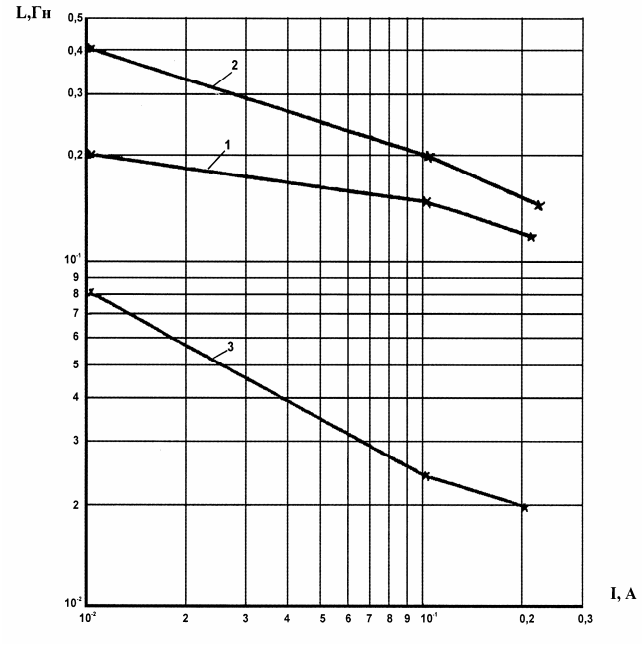

Рис. 3. Зависимость воспламеняющего тока от индуктивности цепи: *1* - замыкающий контакт; *2* - размыкающий контакт; *3* - искрообразующий механизм, рекомендованный МЭК

ного МЭК, и составляет величину порядка 10^{-13}-10^{-18}. Учитывая, что вероятностный характер вос-пламенения проявляется до значений вероятности порядка 10^{-6}-10^{-7} [4], а дальнейшее уменьшение тока или напряжения цепи уже не приводит к воспламенению, то следует полагать, что коммутация искробезопасных цепей реальными контактами не приведет к воспламенению газовой смеси при любом количестве коммутаций.

Таким образом, наличие нормально искрящих контактов реле не приведет к нарушению безопасности, если эти контакты коммутируют искробезопасные цепи. Поэтому существующий подход к оценке искробезопасных цепей, содержащих нормально искрящие контакты, согласно которому при испытаниях цепей с уровнем взрывозащиты "особовзрывобезопасный" производится неограниченное количество повреждений [5], нельзя считать обоснованным.

Учитывая, что в настоящее время в искробезопасных цепях используются различные типы контактов (кнопки, переключатели и т.д.), необходимо оценить увеличение воспламеняющего тока при коммутации цепи этими контактами. Если воспламеняющий ток увеличивается не менее чем в полтора раза по сравнению с воспламеняющим током, определенном для этой цепи на искрообразующем механизме, рекомендованным МЭК, то такие контакты могут не считаться, с точки зрения искробезопасности, нормально искрящими контактами [6, 7]. Оценка искробезопасности цепей, содержащих нормально искрящие контакты, по таким же требованиям, какие предъявляются к цепям, где такие контакты отсутствуют, позволит не только сократить время испытаний, но и существенно упростить решение задач по оценке и обеспечению искробезопасности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. МЭК 60079-11:1999 Электрооборудование для взрывоопасных газовых сред. Часть 1: Искробезопасная электрическая цепь 1.

2. ЕК 50020:2002 Электрооборудование для потенциально взрывоопасных сред - Искробезопасная электрическая цепь 1.

3.ГОСТ Р 51330.10 (МЭК 60079-11-99) Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 1. Искробезопасная электрическая цепь 1.

4. Печук Э.И., Кочерга И.Г. Граница воспламенения метано-воздушной смеси электрическими искрами. Бюллетень МакНИИ, 1956, №2.

5. ГОСТ 22 782.5-78 Электрооборудование взрывозащищенное с видом взрывозащиты «Искробезопасная электрическая цепь» Технические требования и методы испытаний.

6. А.С. N 1465607, Б.И., 1989, N10. Способ испытаний на искробезопасность во взрывной камере электрических цепей, содержащих нормально искрящие контакты. Залогин А.С., Коптиков В.П., Шатило А.Н., Коган Э.Г.

7. Залогин А.С. Новый метод испытаний на искробезопасность горношахтного электрооборудования, содержащего нормально искрящие контакты. В. сб.: Физико-техни-ческие способы и процессы разработки и обогащения полезных ископаемых. - М. ИПКОН АН СССР, 1989, (С. 98-100).

Коротко об авторах

Залогин А.С. – кандидат технических наук, исполнительный директор,
Малкович О.Б. – инженер,

Некоммерческая автономная организация «Центр по сертификации взрывозащищенного и рудничного электрооборудования (ЦСВЭ)».

ТЕКУЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЗАЩИТАХ ДИССЕРТАЦИЙ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ И СМЕЖНЫМ ВОПРОСАМ

Автор	*Название работы*	*Специальность*	*Ученая степень*
ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ			
БЕЛЯЕВ Александр Евгеньевич	Экспериментально-теоретические основы создания исполнительных органов для бурения мерзлых сложноструктурных породных массивов	05.05.06	д.т.н.
ВЛАСОВА Вера Викторовна	Разработка технологии комплексного извлечения полезных компонентов из золошлаковых отходов ТЭС Иркутской области	25.00.13	к.т.н.