

УДК 621.316.9

И.А. Бершадский /д.т.н./, **С.В. Шлепнев** /к.т.н./
 ГУО ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)
А.Ю. Гладков

ГУ «Макеевский научно-исследовательский институт по безопасности работ
 в горной промышленности» (Макеевка)

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАЗРЯДА ЕМКОСТНОЙ ИСКРОБЕЗОПАСНОЙ ЦЕПИ

Приведены и проанализированы экспериментальные зависимости напряжения на разряде, тока разряда I_r от времени при замыкании омической цепи. Уточнены экспериментальным путем постоянная времени установления напряжения на разряде τ и установившееся значение напряжения на разряде, не зависящие от уровня напряжения цепи. Разработана и обоснована усовершенствованная математическая модель разряда емкостной электрической цепи, позволяющая уточнить известный расчетный метод оценки ее искробезопасности.

Ключевые слова: расчетные методы оценки искробезопасности, напряжение на разряде, энергия разряда, длительность разряда, математическая модель разряда.

Постановка проблемы

В большинстве случаев взрывозащищенное электрооборудование с видом взрывозащиты «искробезопасная электрическая цепь» содержит емкостные цепи, определяемые наличием конденсаторов в электрической схеме.

Таким образом, на стадии разработки и при испытаниях данного электрооборудования неоднократно возникает необходимость оценки искробезопасности последовательного, параллельного или смешанного соединения емкостных цепей. Данная оценка на сегодняшний день может быть выполнена как экспериментальным методом с помощью взрывных камер, заполненных испытательной взрывоопасной смесью [1,2], так и расчетными методами [3,4,5].

За счет более высокой достоверности и информативности полученных воспламеняющих параметров, меньшего времени испытаний, возможности в процессе оценки выбирать оптимальные параметры электрооборудования с точки зрения обеспечения взрывобезопасности (учитывается запас) актуальность расчетных методов оценки возрастает.

Анализ вышеуказанных расчетных методов показал, что метод [3] является наиболее перспективным на сегодняшний день, т. к. он имеет самую низкую погрешность (10...20 %) значений емкости цепи, полученных при моделировании и из графиков зависимостей $C(U, R)$ [6]. При этом выявлено расхождение значений параметров разряда (продолжительность, энергия разряда, максимальный ток), полученных при моделировании данным методом и путем эксперимента [7], которое достигает 16...20 %.

Поэтому задача совершенствования математической модели данного метода является актуальной и требует исследований в части уточнения и обоснования ее параметров, обеспечивающих снижение расхождения результатов моделирования и экспериментальных данных.

Анализ последних исследований и публикаций

Основой расчетного метода оценки искробезопасности [3] является математическая модель разряда замыкания. Данная модель основана на постоянстве напряжения на разряде в установившемся режиме на уровне 11 В, экспоненциальном снижении напряжения разряда с начального до установившегося значения с постоянной времени 10^{-9} с.

Согласно [8] для разрядов размыкания установлено, что при положительной полярности на вольфрамовом электроде установившееся значение напряжения на разряде составляет 9,3...11,3 В, а при отрицательной – 8,5...10,3 В. При этом данный уровень не зависит от его начального тока.

В то же время, согласно [9], для разрядов замыкания установлено, что при положительной полярности на вольфрамовом электроде установившееся значение напряжения на разряде составляет 7,6...10,0 В, а при отрицательной – 8,5...10,1 В. При этом данный уровень не зависит от его начального тока. При различных напряжениях больше энергии выделяется в разряд при полярности $WO+Cd-$, которая должна учитываться в компьютерной модели разряда.

Таким образом, в математической модели

разряда замыкания значение установившегося уровня напряжения на разряде соответствует полярности $WO+Cd-$, полученной экспериментально при разрядах размыкания, и не учтены результаты экспериментальных исследований аналогичной величины для разрядов замыкания.

Время установления напряжения на разряде составляет примерно 0,1 мкс и соответствует времени образования при пробое стримеров – узких проводящих (заполненных плазмой) каналов, исходящих от одного из электродов [10]. Следовательно, постоянная времени данного процесса составляет 33 нс.

Для обеспечения условия выделения в разряде за 0,1 мкс всей энергии, накопленной в конденсаторе, постоянная времени установления напряжения на разряде должна быть не более 10^{-9} с [7]. Соответственно, при постоянной времени 33 нс, выделится примерно 94 % от всей энергии конденсатора.

Таким образом, в математической модели разряда замыкания значение постоянной времени соответствует условию выделения всей энергии конденсатора и учитывает время образования при пробое стримеров.

Цель (задачи) исследования

Цель работы состоит в разработке усовершенствованной математической модели разряда емкостной искробезопасной цепи, обеспечивающей снижение расхождения результатов моделирования и экспериментальных данных, полученных на искробезопасном механизме с помощью современных регистрирующих приборов.

Основной материал исследования

Анализ последних исследований и публикаций показал, что параметры, принятые в математической модели [3], не учитывают результаты данных исследований. Для уточнения параметров данной модели необходимо исследовать экспериментальные зависимости формирования

напряжения на разряде от времени при различных напряжениях цепи.

С целью формирования экспериментальных зависимостей переходных процессов замыкания RC , RLC цепей (ток разряда и напряжение на разряде), приближенных по параметрам к переходным процессам, возникающим при проведении оценки экспериментальным методом с помощью взрывных камер, спроектирован специальный искробезопасный механизм (ИМ) разрядов замыкания (рис. 1).

ИМ представляет собой основание из диэлектрического материала 2, на котором закреплены пружинная проводящая пластина 3 фиксатором 1 и кадмиевый диск 5, используемый в искробезопасном механизме при испытаниях электрических цепей камерным способом. В свою очередь, на конце пружинной пластины закреплена изогнутая вольфрамовая проволока 4 диаметром 0,2 мм, также используемая в искробезопасном механизме при испытаниях электрических цепей экспериментальным методом.

Данная конструкция ИМ позволяет регулировать скорость замыкания контактов. Отклонение пластины d прямо пропорционально скорости замыкания проволоки с диском за счет увеличения силы противодействия в пластине при большем отклонении.

Длительность разрядов замыкания является максимальной при низкой скорости замыкания контактов.

Схема регистрации экспериментальных зависимостей переходных процессов RC , RLC цепей при замыкании (рис. 2) включает в себя:

- блок питания постоянного тока с регулируемым и стабилизированным выходным напряжением (БП);
- токоограничительный резистор $R1$, исключающий влияние энергии БП в цепь разряда;
- исследуемую RLC цепь с элементами $C1$, $L1$, $R2$;
- кнопку $S1$, позволяющую исследовать как RLC , так и RC цепи;

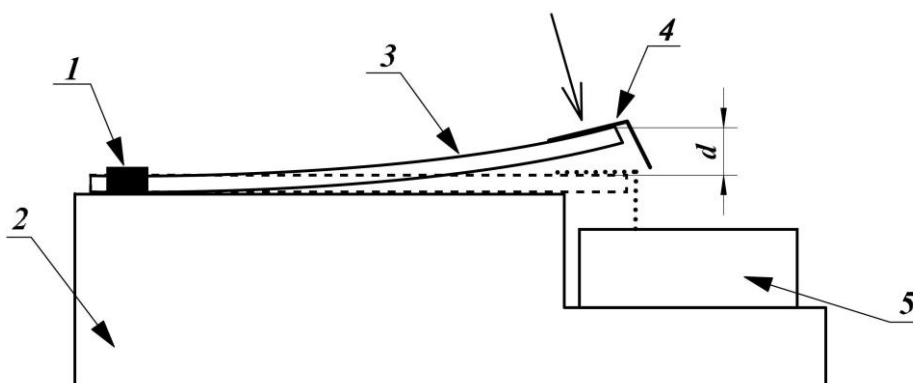


Рис. 1. Искробезопасный механизм разрядов замыкания

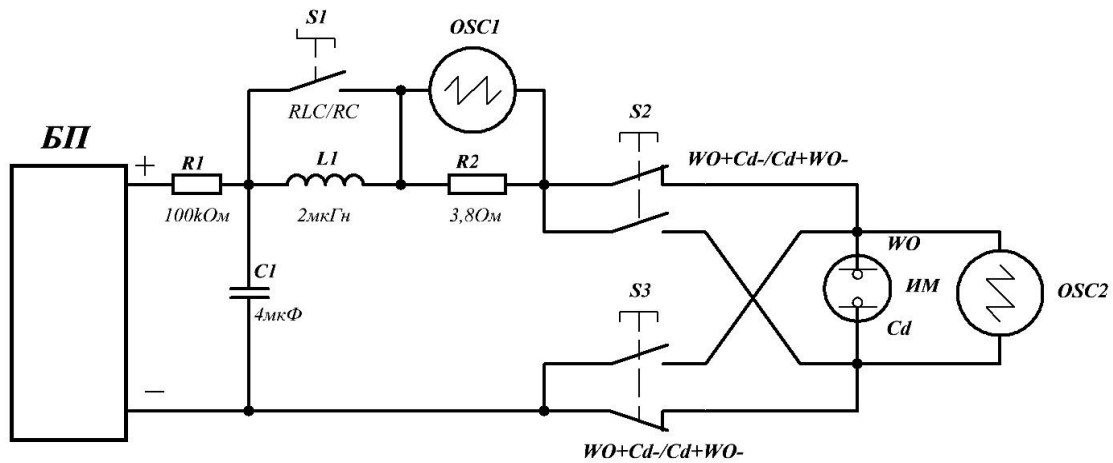


Рис. 2. Схема регистрации экспериментальных зависимостей переходных процессов RC, RLC цепей при замыкании

- кнопки S2, S3, позволяющие производить смену полярности напряжения на элементы ИМ: вольфрамовую проволоку (WO) и кадмиевый диск (Cd);
- искрообразующий механизм ИМ;
- цифровой запоминающий осциллограф с каналами 1 (OSC1) и 2 (OSC2) соответственно.

С целью исключения влияния емкости и индуктивности цепи экспериментальные исследования зависимости формирования напряжения на разряде от времени проводились на омической цепи при разных напряжениях цепи 30 В, 50 В, 70 В с учетом рекомендаций [9] по выбору оптимальной полярности.

На рис. 3 и 4 приведены по пять снятых произвольно экспериментальных зависимостей напряжения на разряде $Up1...Up5$ и тока разряда

$Ip1...Ip5$ от времени T при замыкании омической цепи с параметрами: $R2=3,8$ Ом, $L1=0$ мкГн, $C1=0$ мкФ, $U_{БП}=30$ В с полярностью $WO+Cd-$.

С помощью пакета MathCAD рассчитаны и показаны на данных рисунках средние значения данных зависимостей Up_cp , Ip_cp по формулам (1), (2) соответственно.

$$Up_cp_i = \frac{Up1_i + Up2_i + Up3_i + Up4_i + Up5_i}{5}, \quad (1)$$

где Up_cp_i – среднее значение напряжения на разряде, В; i – номер значения в массивах данных в диапазоне от 1 до N ; N – общее количество значений в массивах; $Up1_i...Up5_i$ – мгновенные значения напряжений на разряде, В.

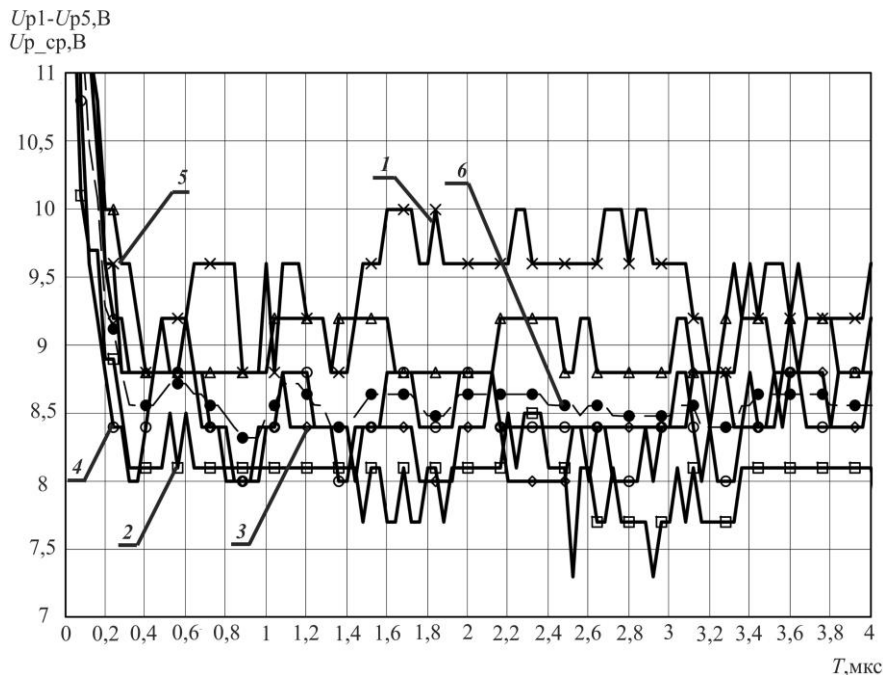


Рис. 3. Зависимости напряжения на разряде от времени: 1 – $Up1$, В; 2 – $Up2$, В; 3 – $Up3$, В; 4 – $Up4$, В; 5 – $Up5$, В; 6 – Up_cp , В

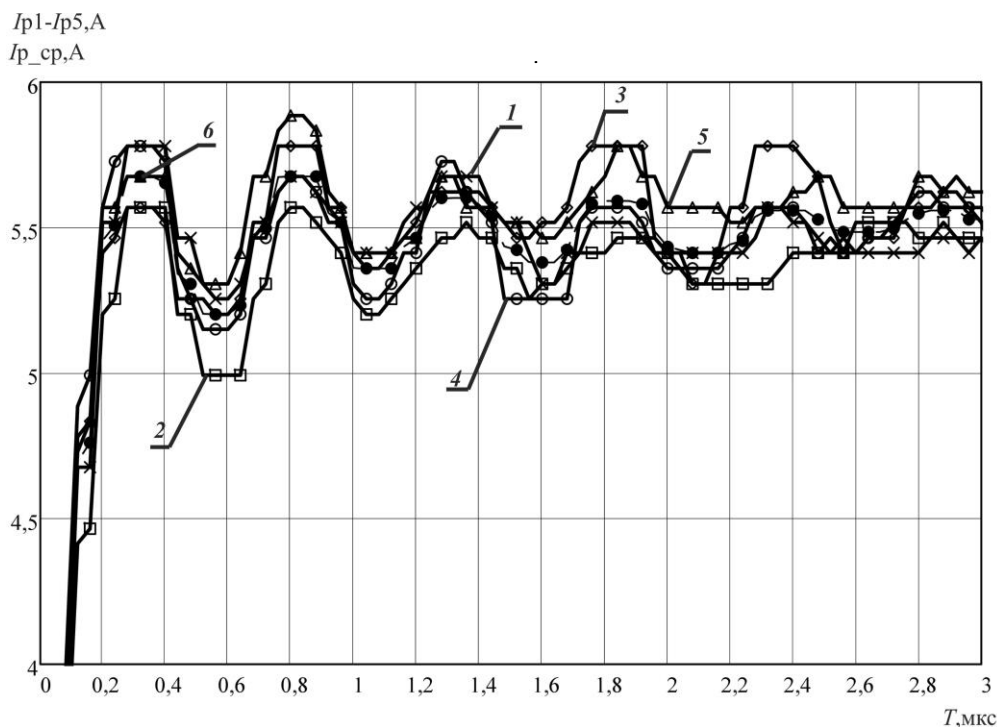


Рис. 4. Зависимости тока разряда от времени:
 1 – I_{p1} , А; 2 – I_{p2} , А; 3 – I_{p3} , А; 4 – I_{p4} , А; 5 – I_{p5} , А; 6 – I_{p_cp} , А

$$I_{p_c_i} = \frac{I_{p1_i} + I_{p2_i} + I_{p3_i} + I_{p4_i} + I_{p5_i}}{5}, \quad (2)$$

где $I_{p_cp_i}$ – среднее значение напряжения разряда, А; $I_{p1_i} \dots I_{p5_i}$ – мгновенные значения токов разряда, А.

Анализ аналогичных экспериментальных исследований омической цепи при напряжениях $U_{БП}=50$ В и 70 В показал отсутствие зависимости уровня напряжения на разряде от напряжения цепи.

Время достижения 95 % от установившихся значений напряжения (кривая 6, см. рис. 3) и тока разряда (кривая 6, см. рис. 4) составляет 0,2...0,3 мкс. Следовательно, учитывая экспоненциальный закон изменения напряжения, постоянная времени установления напряжения на разряде τ составляет 67...100 нс. Причем значение τ не зависит от напряжения цепи, что подтверждено экспериментально аналогичными исследованиями при напряжениях 50 В и 70 В.

Анализ зависимостей (см. рис. 3) дает основание предполагать, что изменение напряжения разряда во времени подчиняется экспоненциальному закону:

$$U_p(T) = ae^{bT} + c. \quad (3)$$

С помощью встроенных функций пакета MathCAD массив усредненных значений напряжения на разряде U_{p_cp} , аппроксимирован с по-

мощью экспоненциальной регрессии вида (3). Найлены коэффициенты аппроксимации: $a=21$ В; $b=-34$ мкс⁻¹; $c=8,9$ В и оценен коэффициент корреляции: 0,96. Листинг программы приведен на рис. 5.

Усовершенствованная математическая модель разряда емкостной искробезопасной цепи основана на изменении сопротивления разряда во времени $R_p(T)$ по экспоненциальному закону (4) и на постоянстве напряжения на разряде в установившемся режиме – 8,9 В.

$$R_p(T) = \frac{(U_{БП} - 8,9)e^{-34 \times 10^6 T} + 8,9}{I_p(T)}, \quad (4)$$

где $R_p(T)$ – мгновенное значение сопротивления разряда, Ом; $U_{БП}$ – напряжение цепи, В; $I_p(T)$ – мгновенное значение тока в разряде, А; T – время, с.

Основные элементы и соотношения компьютерного моделирования разряда емкостной искробезопасной цепи в пакете MicroCAP приведены на рис. 6.

Ключ SW2 в исходном состоянии разомкнут, что обеспечивает заряд конденсатора C1 до напряжения источника питания V1. Переходный процесс запускается в момент замыкания ключа (через 10 мкс, рис. 6). В цепи разряда конденсатора C1=4 мкФ присутствуют сопротивление R3=3,8 Ом и индуктивность, например, L1=2 мкГн.

Экспоненциальная регрессия $f(x) = a \cdot e^{bx} + c$:

$$S := \text{expfit}\left[T, U_{p_cp}, \begin{pmatrix} 21 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix}\right]$$

Нахождение коэффициентов a, b, c:

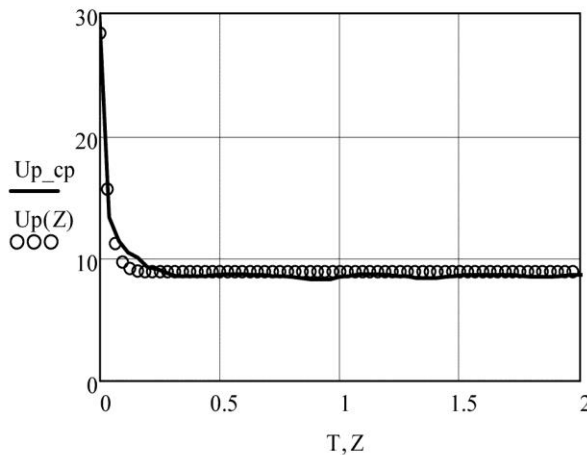
$$S = \begin{pmatrix} 20.97 \\ -33.983 \\ 8.896 \end{pmatrix}$$

Полученная функция:

$$U_p(T) := 21 \cdot e^{-34T} + 8.9$$

Формирование массива времени с шагом, меньшим, чем для массива T:

$$Z := \frac{\max(T) - \min(T)}{10000}, 0.01 .. \max(T)$$

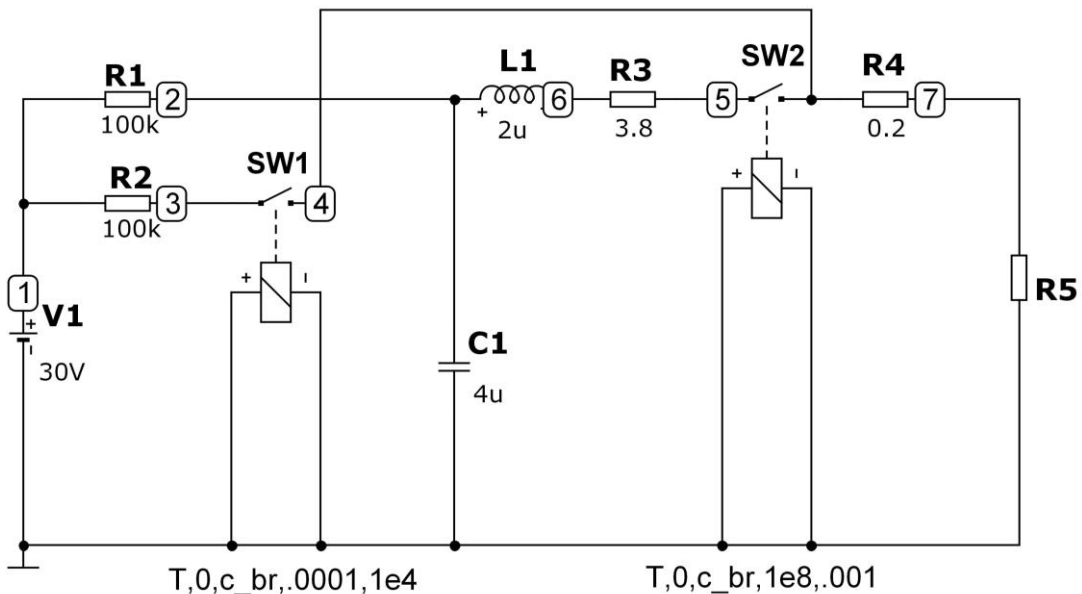


Проверка правильности аппроксимации с помощью коэффициента корреляции

$$\text{corr}(U_p(T), U_{p_cp}) = 0.96$$

Рис. 5. Листинг программы аппроксимации напряжения на разряде с помощью экспоненциальной регрессии

```
.OPTIONS ITL4=50
.define PD if(abs(I(R5))<500m OR T<c_br,0,I(R5)*V(R5))
.define Wr SD(PD)
.DEFINE c_br 10u
.MODEL S1 VSWITCH (RON=0.01)
```



```
R5: if(T<c_br, 1e10,((v(v1)-8.9)*exp(-34e6*(T-c_br))+8.9)/I(R5))
```

Рис. 6. Моделирование разряда емкостной искробезопасной цепи

Сопrotивление $R1=100$ кОм ограничивает ток источника питания $V1$. Ключ $SW1$ в исходном состоянии замкнут, что обеспечивает наличие напряжения холостого хода источника питания $V1$ на модели разряда перед запуском переходного процесса. Резистор $R4$ определяет сопротивление проводов, выводов элементов и т.д. Модель $R5$ показывает изменение во времени сопротивления разрядного промежутка (4), которое, в свою очередь, зависит от параметров разрядного контура.

По результатам расчета переходных процессов схемы, приведенной на рис. 6, построены зависимости основных параметров разряда замыкания (рис. 7) от времени.

На рис. 7а $I(R5)$ – ток разряда через резистор

$R5$, А (кривая 1); W – энергия разряда, мДж (кривая 2). На рис. 7б $V(R5)$ – напряжения на разряде (кривая 1), В; $V(C1)$ – напряжение на конденсаторе $C1$ кривая 2), В; T – время, мкс.

Начальное напряжение на разряде падает от значения напряжения источника $V1$ (см. рис. 6) до установившегося напряжения 8,9 В по экспоненте с постоянной времени 29 нс (кривая 1, рис. 7б). Подсчет энергии W осуществляется непрерывно (кривая 2, рис. 7а) до значения тока разряда $I(R5)$, равного 500 мА.

Расчет времени разряда рекомендуется осуществлять, измеряя относительное время всплеска кривой $I(R5)$ между началом ее роста и величиной тока обрыва разряда (обычно принимается в диапазоне 3...20 мА).

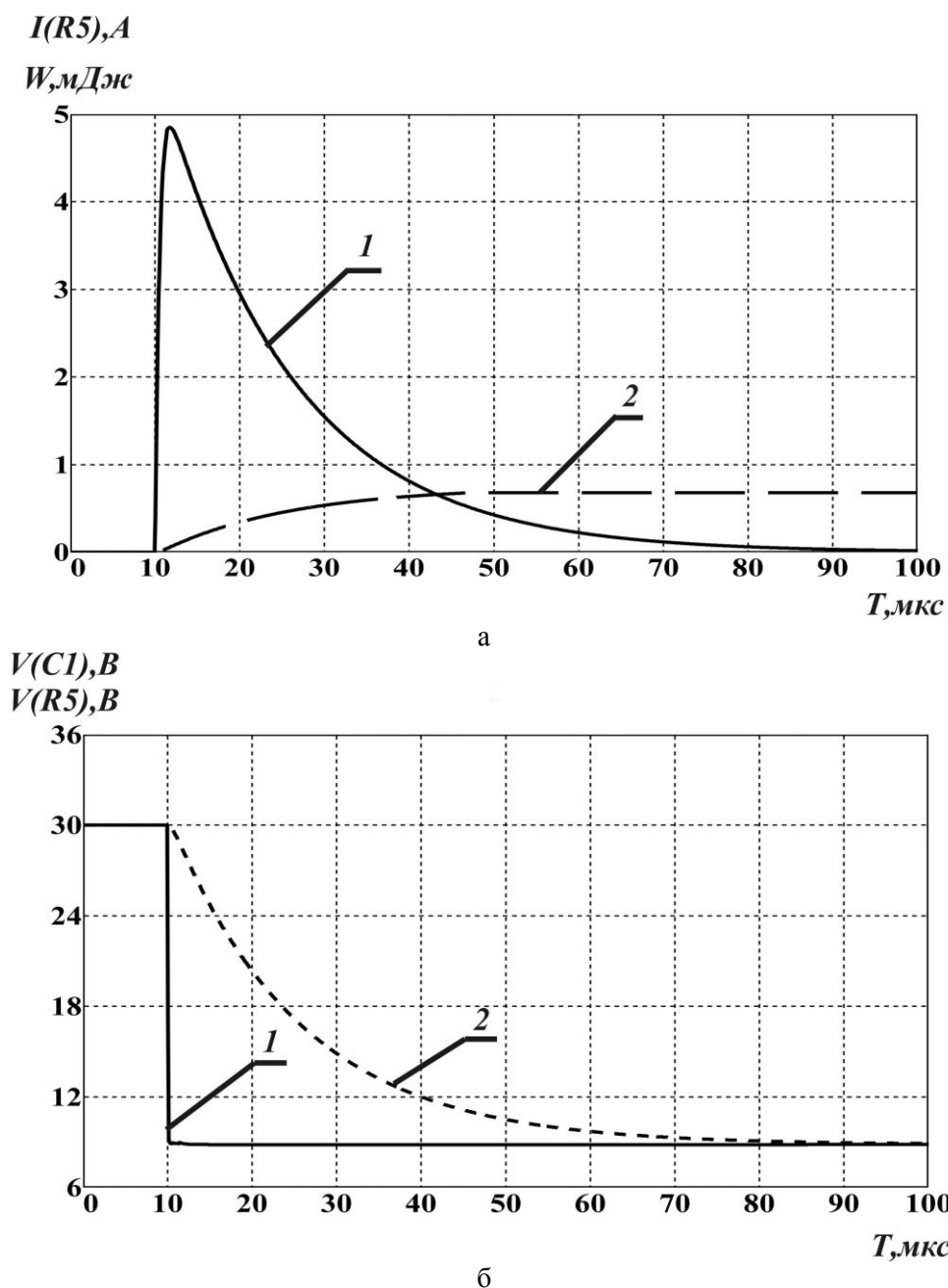


Рис. 7. Зависимости основных параметров разряда замыкания от времени

Табл. 1. Расчетные и экспериментальные данные разряда

E, В	C1, мкФ	L1, мкГн	Экспериментальные кривые			Разработанная модель			Модель [3]		
			W, мкДж	Tr, мкс	Imax, А	W, мкДж	Tr, мкс	Imax, А	W, мкДж	Tr, мкс	Imax, А
30	4	0	715	39	5,1	680	38	5,3	745	36	4,8
50	4	0	1430	49	10	1397	48,3	10,4	1619	47,5	9,8
70	4	0	2150	55	15,3	2117	54,7	15,4	2493	54	14,8
30	4	2	680	39	5	680	37,6	4,9	748	35,9	4,4
50	4	2	1428	49,3	9,2	1390	47,8	9,4	1623	47	8,9
70	4	2	2150	55	14	2100	54	14	2498	53,4	13,5

Правомерность использования усовершенствованной математической модели доказывается сопоставлением расчетных и экспериментальных значений энергии разряда W , продолжительности разряда Tr и максимального тока разряда $Imax$ при токе обрыва искры 0,5 А и $R3=3,8$ Ом (табл. 1).

Выводы

Разработана усовершенствованная математическая модель разряда емкостной искробезопасной цепи, обеспечивающая погрешность результатов моделирования и экспериментальных данных не более 5 %. При этом погрешность в определении параметров разряда путем моделирования [3] и эксперимента достигает 16...20 %. Все это характеризует усовершенствованную модель как более точную при оценке искробезопасности расчетными методами.

Установившееся значение напряжения на разряде в усовершенствованной математической модели уточнено экспериментально и принято равным 8,9 В, что не противоречит результатам ранее проведенных исследований аналогичной величины для разрядов замыкания в емкостной цепи для полярности $WO+Cd-$.

Анализ результатов экспериментальных исследований омической цепи при разных напряжениях цепи показал отсутствие зависимости уровня напряжения на разряде, а также времени установления напряжения на разряде от напряжения цепи.

Постоянная времени установления напряжения на разряде в усовершенствованной математической модели уточнена экспериментально и принята равной 29 нс. При этом обеспечивается условие выделения в разряде всей энергии, которая была накоплена в конденсаторе.

Список литературы

- ГОСТ 22782.5-78. Электрооборудование взрывозащищенное с видом взрывозащиты «искробезопасная электрическая цепь». Технические требования и методы испытаний. –

Введ. с 01.01.80. – М.: Изд-во стандартов, 1979. – С. 24-28.

- ГОСТ 31610.11-2014 (IEC 60079-11:2011). Взрывоопасные среды. Часть 11. Оборудование с видом взрывозащиты «искробезопасная электрическая цепь «i»». – Введ. с 17.06.2015. – М.: ФГУП «Стандартинформ», 2016. – С. 47-50.
- Бершадский, И.А. Тестирование метода бескамерной тепловой оценки искробезопасности схемы источника питания / Взрывозащищенное электрооборудование: Сб. научных трудов УкрНИИВЭ. – Донецк, 2011. – С. 230-240.
- Диденко, В.П. Расчетная оценка искробезопасности емкостных цепей // Сб. научных трудов УкрНИИВЭ «Взрывозащищенное электрооборудование». – Донецк: УкрНИИВЭ, 2009. – С. 258-266.
- ГОСТ Р 51330.10-99 (ГОСТ Р 51330.10-99). Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 11. Искробезопасная электрическая цепь «i»». – Введ. с 01.01.2001. – М.: Госстандарт России, 2000. – С. 48-52.
- ГОСТ Р 51330.10-99 (ГОСТ Р 51330.10-99). Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 11. Искробезопасная электрическая цепь «i»». – Введ. с 01.01.2001. – М.: Госстандарт России, 2000. – С. 54.
- Ерыгин, А.Т. Методы оценки искробезопасности электрических цепей / А.Т. Ерыгин, А.Л. Трембицкий, В.П. Яковлев. – М.: Наука, 1984. – С. 170-174.
- Диденко, В.П. Современные подходы к оценке и обеспечению искробезопасности электрических цепей / Уголь Украины. – 2007. – №9. – С. 39-42.
- Гладков, А.Ю. Экспериментальные исследования разряда короткого замыкания емкостной искробезопасной цепи // Сб. научных трудов НИИВЭ «Взрывозащищенное электрооборудование». – Донецк: НИИВЭ, 2017. – С. 154-164.
- Коган, Э.Г. Способы и средства обеспечения искробезопасности рудничного электрооборудования. – М.: Недра. – 1988. – 101 с.

I.A. Bershadsky /Dr. Sci. (Eng.), S.V. Shlepnev /Cand. Sci. (Eng.)/

Donetsk National Technical University (Donetsk)

A.Yu. Gladkov

Makeyevka State Safety in Mines Research Institute (Makeyevka)

IMPROVING THE MATHEMATICAL DISCHARGE MODEL OF THE CAPACITIVE INTRINSICALLY SAFE CIRCUIT

Background. The use of computational methods for assessing the intrinsic safety of capacitive circuits is the most preferable in relation to experimental ones. However, the parameters adopted in the mathematical model of the calculation method do not fully take into account the results of previous experimental studies. As a result, there is a significant discrepancy between the simulation results and experimental data. Thus, the objective of the paper is to develop an improved mathematical model of the discharge of capacitive intrinsically safe circuit, which reduces the discrepancy between the simulation results and experimental data obtained on the spark-forming mechanism with the help of modern recording devices.

Materials and/or methods. The results of experimental studies have become the basis for determining and refining the basic parameters of the improved mathematical model of the discharge with respect to the setting time constant of the voltage at the discharge τ and the set in voltage at the discharge.

Results. The experimental determination of the main parameters of the improved mathematical model of the discharge allowed significantly increasing the convergence of the simulation results with respect to the experimental data. The error of the simulation results of the improved model and experimental data is not more than 5 %. The error in determining the discharge parameters by modeling with an unspecified known computational method for estimating intrinsic safety and experiment reached 16...20 %.

Conclusion. Application of the improved mathematical discharge model of a capacitive electric circuit increases the accuracy of the known calculation method of assessment of its intrinsic safety.

Keywords: calculation methods of intrinsic safety assessment, voltage at discharge, energy of discharge, discharge duration, mathematical model of the discharge.

Сведения об авторах

И.А. Бершадский

SPIN-код: 4772-3504

Телефон: +380 (50) 212-20-15

Эл. почта: ibernsh164@gmail.com

А.Ю. Гладков

Телефон: +380 (95) 366-02-33

Эл. почта: Gladkov555@rambler.ru

С.В. Шлепнёв

Телефон: +380 (50) 857-22-82

Эл. почта: shlepnev71@mail.ru

Статья поступила 11.01.2019 г.

© И.А. Бершадский, С.В. Шлепнёв, А.Ю. Гладков, 2019

Рецензент д.т.н., проф. Э.Г. Куренный

