

ESTIMATE OF INTRINSIC SAFETY OF CAPACITIVE CIRCUITS**¹Hladkov O.Yu., ²Mnukhin A.H., ³Stasevych R.K.***¹Subsidiary enterprise «Production and engineering firm «SHATL», ²Zaporizhzhia State engineering academy, ³Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poliakov of National Academy of Sciences of Ukraine***РОЗРАХУНКОВА ОЦІНКА ІСКРОБЕЗПЕКИ ЄМНІСНИХ КІЛ****¹Гладков О.Ю., ²Мнухін А.Г., ³Стасевич Р.К.***¹Дочірнє підприємство «Виробничо-конструкторська фірма «ШАТЛ», ²Запорізька державна інженерна академія, ³Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України***РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ИСКРОБЕЗОПАСНОСТИ ЕМКОСТНЫХ ЦЕПЕЙ****¹Гладков О.Ю., ²Мнухин А.Г., ³Стасевич Р.К.***¹Дочернее предприятие производственно-конструкторская фирма «ШАТЛ», ²Запорожская государственная инженерная академия, ³Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины*

Annotation. The purpose of this research work is the development and the testing of universal method for computer estimate of intrinsic safety of inductive capacitive circuits, which takes into account the most hazardous discharge type by contact closure and the obtainment of regression dependences of minimal igniting energy on discharge time in a capacitive circuit and the comparison of results with available experimental dependences. The special aspects of suggested method for evaluation of intrinsic safety of capacitive circuits come down to development of a universal computer model of contact closure discharge and obtainment of regression dependences of minimal igniting energy on discharge time in a capacitive circuit. The development of a universal computer model of contact closure discharge was carried out with the help of empirical and theoretical studies. The developed computer model of a short circuit discharge makes it possible to determine the estimated dependence of energy and time of existing of a short circuit discharge in inductance-capacitance circuit for evaluation of intrinsic safety of complex circuits which parameters are missing in regulatory documents. The reproducibility of modeling in response to experimental data does not exceed 95 %, which characterizes this model as a relative precise one. The obtainment of regression dependences of allowable igniting energy on discharge time in capacitive circuit was made by means of methods of empiric and experimental studies. Analytical dependences of the most suitable regression equations and their approximation coefficients are found. The approximation accuracy was 0.99. The regression equation is obtained, which relates the minimum ignition energy and discharge time, as well as the voltage of the circuit capacitance. Estimation of intrinsic safety of capacitive circuits comes down to calculation of values of released discharge energy and its duration by means of modeling of the circuit being estimated with the help of computer model taking into account reserve coefficient, determination of minimum igniting energy depending on circuit voltage. As follows from the analysis, the discordance between data obtained and GOST data does not exceed 15 %. The use of method for assessment of electric circuits of intrinsic safe equipment being developed for gaseous mines reduces significantly the time of its implementation with more exact following the parameters of intrinsic safety and leads therefore to risk reduction of an explosion and freely burning fire occurrence.

Keywords: coal industry, calculation methods, intrinsic safety assessment, discharge energy, reliability of results.

Introduction. Explosion safety of industrial processes in coal industry of Ukraine is an integrant part of labour protection and safety system. One of the main principles of decrease of explosion risk is prevention of active ignition sources by means of use of prevention measurements in mine equipment – explosion protection types.

The most effective of these measurements is explosion protection type “intrinsic safe electric circuit “i”. It creates such conditions that an electric discharge in a circuit and heated equipment components cannot ignite explosion medium by ordinary

operation and taking into account the damage of equipment components considered [1, 2] even in presence of explosive atmosphere carrying voltage. This property unique for this explosion protection type as well as a variety of other advantages (lesser weight and dimensions of the product, a more simple manufacturing technique and corresponding a lesser price) causes its widespread use in mine connecting, monitoring an aerogas control devices etc.

Implementation of a capability of explosion protection type “intrinsic safe electric circuit” is inherent in solving of the problem of objectivity increase of evaluation method for valid parameter, development labor input decrease by means of development of new beadless evaluation methods of intrinsic safety of electric circuits. At the present time, for the purpose of beadless evaluation of intrinsic safety of capacitive circuits the dependences of minimal igniting voltage on capacity are used taking into account the limiting resistance obtained for essential gas mixtures (GOST 22782.5, IEC 60079-11, DSTU EN60079-11). Circuits with severe conformity to dependences provided occur rare in actual practice; their use is limited to a short range of capacity values of capacitor and resistance of limiting resistor for which these dependences are available. Therewith, inductive elements often occur in discharge resistor circuits and the complex evaluation of intrinsic safety for a common case of branched circuit is impossible. Therefore the development of estimate of intrinsic safety of such circuits is a relevant objective.

The purpose of this research work is the development and the testing of universal method for computer estimate of intrinsic safety of inductive capacitive circuits, which takes into account the most hazardous discharge type by contact closure and the obtainment of regression dependences of minimal igniting energy on discharge time in a capacitive circuit and the comparison of results with available experimental dependences.

Methods. In most cases occurring in actual practice the evaluated capacitive circuits of intrinsic safe equipment can come down to circuits (Fig. 1) consisting of a series-parallel connection of direct-current power supply E , condenser C , direct-current resistances R , inductor L and sparking switching appliance SM (Fig. 1 a). A circuit can also include a condenser C or a cable, shunting inductor L with the resistance R or shunting a discharge gap (Fig. 1, b, c).

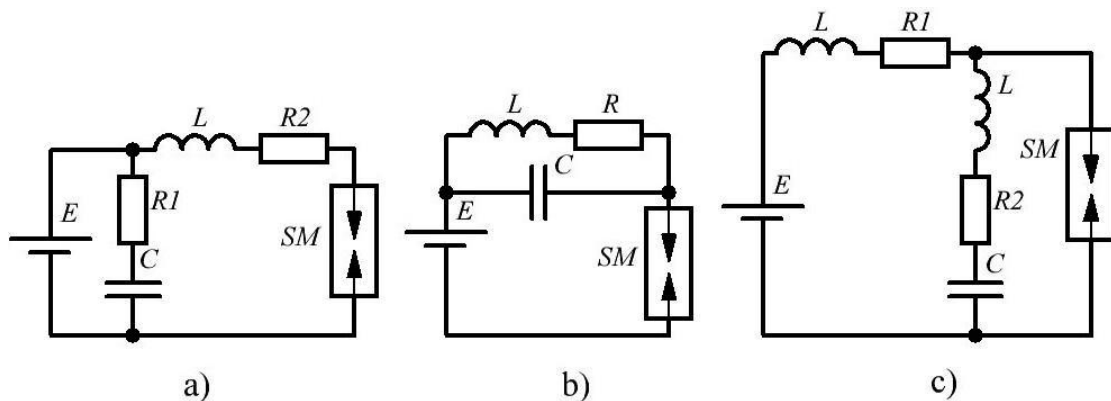


Figure 1 - Equivalent schemes of capacitive circuits

For inductance-capacitance circuits in research work [3] mathematical expressions are derived, which determinate discharge duration T_p , peak current i_{\max} and short circuit discharge W_p . However, their use demands knowledge of transition process character (non-periodic, oscillation discharge, critical behavior). Besides, they are not suitable for evaluation of intrinsic safety of capacitive circuits in real schemes including complex combination of components.

The special aspects of suggested method for evaluation of intrinsic safety of capacitive circuits come down to development of a universal computer model of contact closure discharge and obtainment of regression dependences of minimal igniting energy on discharge time in a capacitive circuit.

The development of a universal computer model of contact closure discharge was carried out with the help of empirical and theoretical studies, which are outlined as follows.

In intrinsic safety a single short circuit and intermittent sparking are considered. These two types of spark formation are used by testing of circuits with live capacitors in inductance-capacitance circuits being the most aggressive in respect of ignition of explosive gas mixtures [4]. It has been validated experimentally, that for these types of discharge the same model of current decrease can be taken [5]. The process of spark forming by contact closure includes several stages. By approach of electrodes of switching appliance SM its voltage corresponds to voltage of power supply source of the circuit E . By touching of contacts discharge current occurs, which causes intensive evaporation of contact metal and forming of streamers – narrow conductive (filled with plasma) channels coming from one of the electrodes for a time period of $0.1 \mu s$ [6]. Thus the time constant for this process τ amounts to $33-34 ns^{-1}$. This process is accompanied by voltage decrease on discharge gap due to exponential law from power supply source voltage of circuit E to steady-state value U_0 . It remains constant during the whole discharge $U_p = \text{const} = U_0$ [3]. According the data of experimental studies [7] we take the value $U_0 = 9 V$. Disappearance of the arc is caused by decrease of discharge current to the value of $i_p = i_0 < 250 mA$ for single short circuits and $3-20 mA$ for intermittent sparking. After that a metal contact closure occurs – the voltage tends to zero. Consequently, equation describing the transition process of voltage changing on discharge $U_p(t)$ including the above mentioned stages of short circuit discharge occurrence is as follows

$$U_p(t) = (E - U_0)e^{-\tau t} + U_0 \quad (1)$$

The spark forming mechanism can be conveniently conceived of as mathematical (computer) model, representing the discharge characteristics of capacitive circuit (1) through the discharge resistance

$$R_p(t) = \frac{U_p(t)}{I_p(t)} = \frac{(E - U_0)e^{-\tau t} + U_0}{I_p(t)} = \frac{(E - 9)e^{-34 \cdot 10^9 t} + 9}{I_p(t)} \quad (2)$$

The switch $SW2$ ensures the startup of discharge transition process. In initial state it is disconnected, which ensures the charge of condenser $C1$ to voltage value of power supply source E . The transition process is started at the moment of switch connection (in $10 \mu\text{s}$). Resistors $R1$, $R2$ exclude the influence of power supply source on discharge parameters by means of current restriction to 2 mA. The switch $SW1$ in initial state is connected, which ensures the presence of open-circuit voltage of power supply source E on spark forming mechanism before the startup of transition process. Resistor $R_0=0.1 \text{ Ohm}$ determines the resistance of cables, cell terminals etc. The model SM shows the changes in time of resistance of discharge gap (2), which in its turn depends on parameters of discharge circuit. The capacitive circuit under consideration consists from condenser $C1$, resistor $R3$ and inductor $L1$.

The computer model (Fig. 2) is basis for obtainment of base data by using the method of process modeling of arc commutation in capacitive electric circuits for their evaluation: discharge energy $W_p(T_p)$, discharge duration T_p . It is recommended to determine the calculation of discharge time as a relative peak time of discharge current curve $I(SM)$ between the beginning of its growth and the current value of discharge break $I(t)=i_0=3 \text{ mA}$ (Fig. 3). The discharge energy is determined graphically by value of running time corresponding to discharge duration.

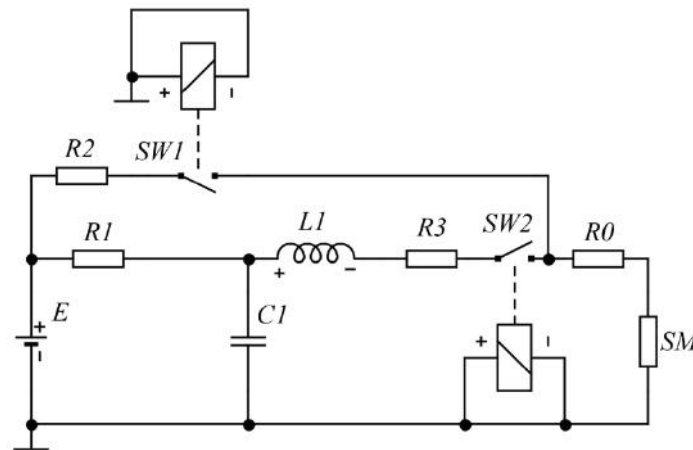


Figure 2 - Scheme of computer model for calculation of discharge parameters of an intrinsic safe capacitive circuit

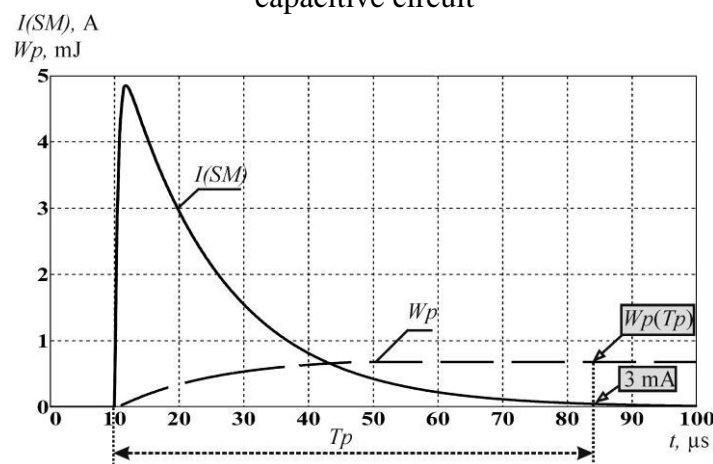


Figure 3 - Dependences of main short circuit discharge on time

Results and discussion. The developed computer model of a short circuit discharge (Fig. 2) makes it possible to determine the estimated dependence of energy and time of existing of a short circuit discharge in inductance-capacitance circuit for evaluation of intrinsic safety of complex circuits which parameters are missing in regulatory documents.

Studies of igniting ability of capacitive circuits with limiting resistor in discharge circuit according to DSTU EN60079-11 give background for determination of evaluated dependence of minimal igniting (allowable) energy on discharge time both in capacitive and inductance-capacitance circuits with limiting resistor for group I. As a result, the regression equations are obtained for explosive mixture of group I connecting minimal igniting energy (3)-(5), discharge time and voltage of capacitive circuit. Both model and dependences obtained allow to make a comparative evaluation of intrinsic safety due to released energy in capacitive circuit with a certainty of not less than 15 % compared to curves [8].

The evidence for proper use of computer model taken is comparison of calculated and experimental values for discharge duration and discharge energy (Table 1) by arc brake current of 3 mA and resistor of $R_3=3.8$ Ohm. The experimental data are obtained by means of standardized spark forming mechanism [8] by means of fixation of transition process of discharge current and voltage with digital oscilloscope TDS2022.

The reproducibility of modeling in response to experimental data does not exceed 5 % (Table 1), which characterizes this model as a relative precise one.

The obtainment of regression dependences of allowable igniting energy on discharge time in capacitive circuit was made by means of methods of empiric and experimental studies which are outlined as follows.

Table 1 - Comparison of experimental and calculated values for discharge time and maximum current surge in capacitive circuits

E, V	$CI, \mu F$	$LI, \mu H$	Experimental curves			Model		
			$W_p, \mu J$	$T_p, \mu s$	I_{max}, A	$W_p, \mu J$	$T_p, \mu s$	I_{max}, A
30	4	0	715	39.0	5.1	680	38.0	5.3
50	4	0	1430	49.0	10.0	1397	48.3	10.4
70	4	0	2150	55.0	15.3	2117	54.7	15.4
30	4	2	680	39.0	5.0	680	37.6	4.9
50	4	2	1428	49.3	9.2	1390	47.8	9.4
70	4	2	2150	55.0	14.0	2100	54.0	14.0

The reproducibility of modeling in response to experimental data does not exceed 5 % (Table 1), which characterizes this model as a relative precise one.

The obtainment of regression dependences of allowable igniting energy on discharge time in capacitive circuit was made by means of methods of empiric and experimental studies which are outlined as follows.

In accordance with dependence of minimal igniting voltage on circuit capacity for group I [8] the values of electric circuit parameters are determined: resistance of

current limiting resistor R, Ohm as well as capacities C, μF by circuit voltage of E = 20 V, 30 V, 50 V, 70 V, 100 V, 200 V, 300 V. With the help of computer model (Fig. 2) by L1=0, arc brake current of 3 mA the values are calculated for discharge energy WB and its duration Tp for these capacitive circuits (Table 2, Fig. 4).

Table 2 - Results of modeling of igniting parameters

Circuit parameters			Discharge parameters		Circuit parameters			Discharge parameters	
E, V	R3, Ohm	CI, μF	Tp, ms	WB, mJ	E, V	R3, Ohm	CI, μF	Tp, ms	WB, mJ
20	0	24.0	0.0466	2.372	100	0	0.68	0.0005	0.736
20	5.6	200.0	7.5100	19.700	100	5.6	2.50	0.1240	2.044
30	0	7.2	0.0147	1.361	100	15.0	4.70	0.5460	3.816
30	5.6	28.0	1.1570	5.255	100	40.0	9.00	2.4070	7.292
30	15.0	90.0	8.4270	16.869	200	0	0.22	0.0003	0.997
50	0	2.4	0.0050	0.922	200	5.6	0.80	0.0430	1.442
50	5.6	9.0	0.4070	3.295	200	15.0	1.50	0.1900	2.583
50	15.0	18.0	1.8690	6.579	200	40.0	2.70	0.8030	4.602
50	40.0	60.0	14.128	21.892	300	0	0.12	0.0001	1.195
70	0	1.3	0.0025	0.801	300	5.6	0.43	0.0237	1.288
70	5.6	4.9	0.2320	2.672	300	15.0	0.75	0.1000	2.022
70	15.0	8.6	0.9450	4.677	300	40.0	1.50	0.4720	3.915
70	40.0	22.0	5.5320	11.945					

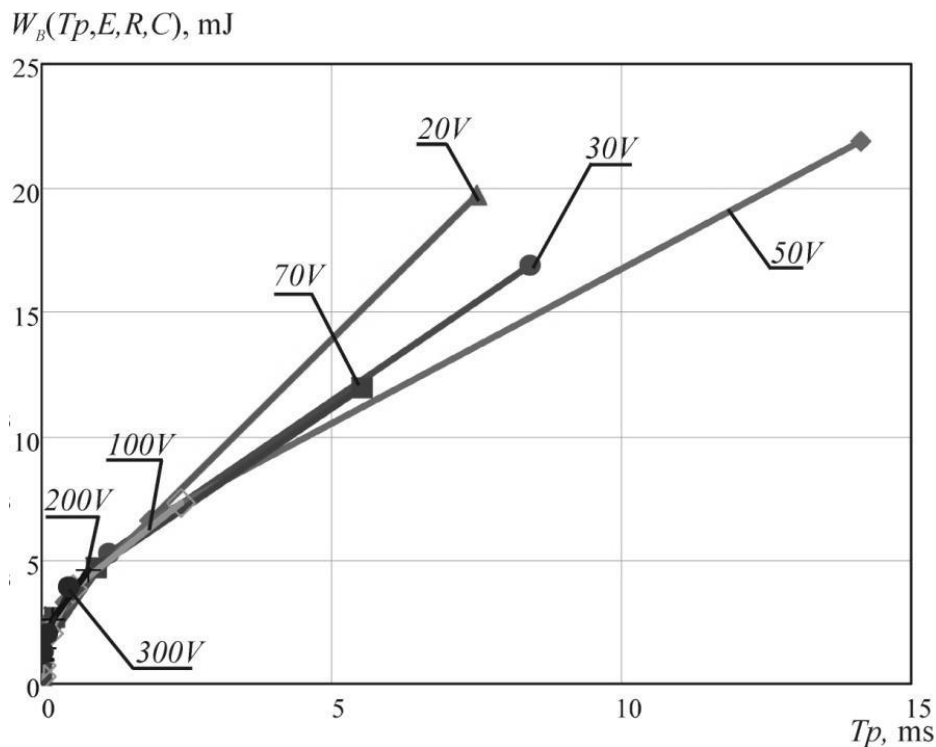


Figure 4 - Results of modeling of igniting parameters

$$W_B(T_p) = a_{20_50}(E) \cdot \ln(T_p) + b_{20_50}(E) \cdot \sqrt{T_p} + c_{20_50}(E) \cdot T_p \quad (3)$$

for voltages E: 50-100 V

$$W_B(T_p) = a_{50_100}(E) \cdot \ln(T_p) + b_{50_100}(E) \cdot \sqrt{T_p} + c_{50_100}(E) \cdot T_p + d_{50_100}(E) \quad (4)$$

for voltages E : 100 – 300 V

$$W_B(T_p) = a_{100_300}(E) \cdot \ln(T_p) + b_{100_300}(E) \cdot \sqrt{T_p} + c_{100_300}(E) \quad (5)$$

For each voltage E approximation coefficients are found and correlation coefficient is evaluated. Approximation accuracy in all cases is 0.99. For data package groups obtained for coefficients determined by voltage range of 20-50 V, 50-100 V and 100-300 V, their analytical dependences are found by means of approximation with the help of most suitable regression equations as well as approximation coefficients (6-15):

$$a_{20_50}(E) = 5.46482 \cdot 10^{-4} \cdot \ln(E) - 1.5901 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{E} - 1.0699 \cdot 10^{-3} \quad (6)$$

$$b_{20_50}(E) = -0.27524 \cdot \ln(E) + 0.09511 \cdot \sqrt{E} + 0.52917 \quad (7)$$

$$c_{20_50}(E) = -1.96566 \cdot \ln(E) + 0.48255 \cdot \sqrt{E} + 4.75756 \quad (8)$$

$$a_{50_100}(E) = 3.35309 \cdot 10^{-3} \cdot \ln(E) - 8.47823 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{E} - 7.03139 \cdot 10^{-3} \quad (9)$$

$$b_{50_100}(E) = -1.40448 \cdot \ln(E) + 0.35628 \cdot \sqrt{E} + 3.0711 \quad (10)$$

$$c_{50_100}(E) = 17.92744 \cdot \ln(E) - 4.58814 \cdot \sqrt{E} - 37.0445 \quad (11)$$

$$d_{50_100}(E) = 0.03506 \cdot \ln(E) - 8.79152 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{E} - 0.07319 \quad (12)$$

$$a_{100_300}(E) = -1.91183 \cdot 10^{-6} \cdot \ln(E) - 6.48252 \cdot 10^{-7} \cdot E + 3.93709 \cdot 10^{-5} \quad (13)$$

$$b_{100_300}(E) = -0.04866 \cdot \ln(E) + 4.87319 \cdot 10^{-4} \cdot E + 0.31438 \quad (14)$$

$$c_{100_300}(E) = -4.77263 \cdot 10^{-4} \cdot \ln(E) - 1.02811 \cdot 10^{-5} \cdot E - 7.78864 \cdot 10^{-4} \quad (15)$$

Approximation accuracy for all equations (6-15) is 0.99.

Estimation of intrinsic safety of capacitive circuits comes down to calculation of values of released discharge energy W_p and its duration T_p by means of modeling of the circuit being estimated with the help of computer model (Fig. 2) taking into account reserve coefficient $1.5 \cdot E$, determination of minimum igniting energy $W_B(T_p)$ due to (3-5) taking into account (6-15) depending on circuit voltage E . The criterion for intrinsic safety is fulfillment of the following condition:

$$W_B(T_p) - W_p(T_p) \geq 0 \quad (16)$$

Let us consider the developed methods for evaluation of intrinsic safety by the example of the scheme (Fig. 2) with following parameters $E=40$ V, $R3=5.6$ Ohm and $C1=12$ μ F, 13.5 μ F and 15 μ F. The dependence of allowable igniting energy on discharge time $W_B(T_p)$ from the formula (3) taking into account (6)-(8) is set out in Figure 5.

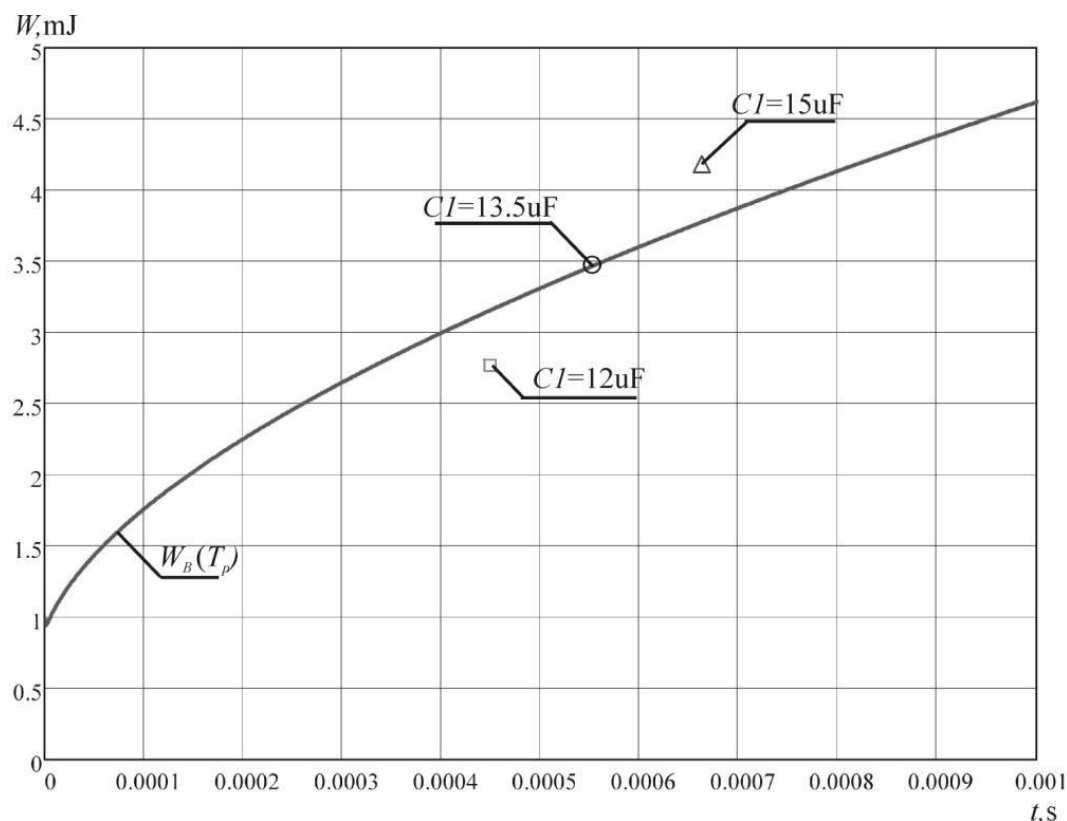


Figure 5 – Dependence of allowable igniting energy (full line) and energy released in discharge on time

The diagram in Figure 5 shows reference points for capacities $CI=12 \mu\text{F}$, $CI=13.5 \mu\text{F}$, $CI=15 \mu\text{F}$, respectively. For the three capacity values, the condition of compliance with intrinsic safety (16) is fulfilled for 12 and 13.5 μF only.

In accordance with GOST curves for indicated parameters the allowable capacity does not exceed 15 μF .

As follows from the analysis, the discordance between data obtained and GOST data does not exceed 15 %.

Conclusions. The use of method for assessment of electric circuits of intrinsic safe equipment being developed for gaseous mines reduces significantly the time of its implementation with more exact following the parameters of intrinsic safety and leads therefore to risk reduction of an explosion and freely burning fire occurrence.

REFERENCES

1. Gladkov O. Yu., Mnuhkhin A. G. and Shmanyov S. V. (2018), "Optimisation of mine lighting in respect of terminal parameter of intrinsic safety, *Up-to-date resource- and energy- saving technologies in mining industry. Research and practice journal: Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, Kremenchuk: KrNU, Issue 2, no. 22, pp. 94–106.
2. Gladkov A. Yu., Boltunov O. G. and Tarasenko S. L. (2015). "Metod rascheta parametrov sistem osveshcheniya dlya otsenki ikh iskrobezopasnosti", *Sposoby i sredstva sozdaniya bezopasnykh i zdorovykh usloviy truda v ugol'nykh shakhtakh*, vol.1, no. 35, pp. 46-55.
3. Erygin A.T., Trembitsky A.L. and Yakovlev V.P. (1984). *Metody otsenki iskrobezopasnosti elektricheskikh tsepey* [Intrinsic safety assessment methods for electrical circuits], Nauka, Moscow, Russian.
4. Petrenko B.A. (1963). "Elektricheskiy razryad v iskrobezopasnykh tsepyakh", *Mekhanizatsiya i avtomatizatsiya v gornoy promyshlennosti*, vol. 3, pp. 300 – 317.
5. Kravchenko V.S, Serov V.I, Erygin A.T. and Pogorelsky A.E. (1976), *Iskrobezopasnost elektricheskikh tsepey* [Intrinsic safety of electrical circuits], Nauka, Moscow, SU.
6. Kogan E.G. (1988), *Sposoby i sredstva obespecheniya iskrobezopasnosti rudnichnogo elektrooborudovaniya* [Methods and means of ensuring intrinsic safety of mine electrical equipment], Nauka, Moscow, SU.

7. Didenko V.P. (2007), "Sovremennyye podkhody k otsenke i obespecheniyu iskrobezopasnosti elektricheskikh tsepey", *Coal of Ukraine*, vol. 9, pp. 39–42.

8. DP "UkrNDNTS", (2016), *DSTU EN 60079-11:2016. Vybukhonebezpechni hazovi seredovishcha. Chastyna 11. Zakhyst elektrychnoho obladnannya za dopomohoyu iskrobezpechnoho elektrychnoho kola «i»*, [DSTU EN 60079-11:2016. Explosive gas environments. Part 11. Protection of Electrical Equipment with the Intrinsically Safe Circuit "I"] DP "UkrNDNTS", Kyiv, Ukraine.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гладков О. Ю., Мнухін А. Г., Шманьов С. В. Оптимізація шахтного освітлення з урахуванням граничних параметрів іскробезпеки // Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва. Кременчук: Кременчуц. нац. ун-т ім. М. Остроградського, 2018. № 2(22). С. 94–106.

2. Гладков А.Ю., Болунов О. Г., Тарасенко С. Л. Метод расчета параметров систем освещения для оценки их искробезопасности // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах. Макеевка, 2015. №1(35). С. 46-55.

3. Ерыгин А.Т., Трембицкий А.Л., Яковлев В.П. Методы оценки искробезопасности электрических цепей. Москва: Наука, 1984. 256 с.

4. Петренко Б.А. Электрический разряд в искробезопасных цепях // Механизация и автоматизация в горной промышленности. Москва: Госгортехиздат, 1963. Вып. 3. С. 300 – 317.

5. Кравченко В.С., Серов В.И., Ерыгин А.Т., Погорельский А.Е. Искробезопасность электрических цепей. Москва: Наука, 1976. 206 с.

6. Коган Э.Г. Способы и средства обеспечения искробезопасности рудничного электрооборудования. Москва: Недра, 1988. 101 с.

7. Диденко В.П. Современные подходы к оценке и обеспечению искробезопасности электрических цепей // Уголь Украины. 2007. №9. С. 39–42.

8. ДСТУ EN 60079-11:2016 «Вибухонебезпечні газові середовища. Частина 11. Захист електричного обладнання за допомогою іскробезпечного електричного кола «і»». Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. 225 с.

About the authors

Hladkov Oleksandr Yuriiyovych, Master of Science, Subsidiary enterprise «Production and engineering firm «SHATL», Kryvyi Rih, Ukraine, gladkov55@ukr.net.

Mnukhin Anatolii Hryhorovych, Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Professor, Head of the research laboratory of the Zaporizhzhia State Engineering Academy, Zaporizhzhia, Ukraine, anatoly.mnukhin@gmail.com.

Stasevych Rysard Kazymyrovych, Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Senior Researcher of Department of Underground Coal Mining Technology, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poliakov of National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NAS of Ukraine), Dnipro, Ukraine, rishardstas@gmail.com

Об авторов

Гладков Олександр Юрійович, магістр, Дочірнє підприємство виробничо-конструкторська фірма «ШАТЛ», Кривий Ріг, Україна, gladkov55@ukr.net

Мнухін Анатолій Григорович, доктор технічних наук, професор, завідувач науково-дослідної лабораторії, Запорізька державна інженерна академія, Запоріжжя, Україна, anatoly.mnukhin@gmail.com

Стасевич Ришард Казимирович, доктор технічних наук, старший науковий співробітник відділу проблем технології підземної розробки вугільних родовищ, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАН України), Дніпро, Україна, rishardstas@gmail.com

Анотація. Мета роботи полягає в створенні і тестуванні універсального методу комп'ютерної оцінки іскробезпеки індуктивно-ємнісних кіл, що враховує найбільш небезпечний вид розряду при замиканні контактів, а також отримання регресійних залежностей мінімальної запалюючої енергії від часу розряду в ємнісному колі і порівняння результатів з наявними експериментальними залежностями. Особливості запропонованого методу розрахункової оцінки іскробезпеки ємнісних кіл зводиться до розробки універсальної комп'ютерної моделі розряду замикання контактів і отримання регресійних залежностей мінімальної запалюючої енергії від часу розряду в ємнісному колі. Розробка універсальної комп'ютерної моделі розряду замикання контактів проводилася за допомогою методів емпіричних і теоретичних досліджень. Розроблена комп'ютерна модель розряду замикання дозволяє визначати розрахункові залежності енергії і часу існування розряду замикання в індуктивно-ємнісного контурі для оцінки іскробезпеки складних кіл, параметри яких відсутні в нормативних документах. Збіжність результатів моделювання по відношенню до експериментальних даних становить не менше 95%, що характеризує цю модель як порівняно точну. Отримання регресійних залежностей допустимої запалюючої енергії від часу розряду в ємнісному колі проводилася за допомогою методів емпіричних і експериментальних досліджень. Знайдено аналітичні залежності найбільш підходящих регресійних рівнянь і їх коефіцієнти апроксимації. Точність апроксимації склала 0,99. Отримано рівняння регресії, що зв'язують мінімальну займисті енергію і час розряду, а також напруга ємності кола. Розроблений метод оцінки іскробезпеки ємнісних кіл зводиться до розрахунку значень енергії, що виділяється розряду і його тривалості шляхом моделювання

оцінюваної кола за допомогою комп'ютерної моделі з урахуванням коефіцієнта запасу, визначення мінімально запалює енергії в залежності від напруги кола. В результаті аналізу було виявлено, що розбіжності між отриманими даними і даними ДСТУ не перевищують 15%. Застосування розробленого методу при оцінці електричних кіл розробляється іскробезпечного устаткування для шахт, небезпечних за газом значно скорочує терміни його впровадження з більш достовірним дотриманням параметрів іскробезпеки і тим самим призводить до зниження ризику виникнення вибуху та екзогенного пожежі в шахті.

Ключові слова: вугільна промисловість, розрахункові методи, оцінка іскробезпеки, енергія розряду, достовірність результатів.

Аннотация. Цель работы состоит в создании и тестировании универсального метода компьютерной оценки искробезопасности индуктивно-емкостных цепей, учитывающего наиболее опасный вид разряда при замыкании контактов, а также получение регрессионных зависимостей минимальной воспламеняющей энергии от времени разряда в емкостной цепи и сравнение результатов с имеющимися экспериментальными зависимостями. Особенности предлагаемого метода расчетной оценки искробезопасности емкостных цепей сводится к разработке универсальной компьютерной модели разряда замыкания контактов и получению регрессионных зависимостей минимальной воспламеняющей энергии от времени разряда в емкостной цепи. Разработка универсальной компьютерной модели разряда замыкания контактов проводилась с помощью методов эмпирических и теоретических исследований. Разработанная компьютерная модель разряда замыкания позволяет определять расчетные зависимости энергии и времени существования разряда замыкания в индуктивно-емкостном контуре для оценки искробезопасности сложных цепей, параметры которых отсутствуют в нормативных документах. Сходимость результатов моделирования по отношению к экспериментальным данным составляет не менее 95%, что характеризует данную модель как сравнительно точную. Получение регрессионных зависимостей допустимой воспламеняющей энергии от времени разряда в емкостной цепи проводилось с помощью методов эмпирических и экспериментальных исследований. Найдены аналитические зависимости наиболее подходящих регрессионных уравнений и их коэффициенты аппроксимации. Точность аппроксимации составила 0,99. Получено уравнение регрессии, связывающие минимальную воспламеняющую энергию и время разряда, а также напряжение ёмкости цепи. Разработанный метод оценки искробезопасности емкостных цепей сводится к расчету значений выделяемой энергии разряда и его продолжительности путем моделирования оцениваемой цепи с помощью компьютерной модели с учетом коэффициента запаса, определению минимально воспламеняющей энергии в зависимости от напряжения цепи. В результате анализа было выявлено, что расхождения между полученными данными и данными ГОСТа не превышают 15 %. Применение разработанного метода при оценке электрических цепей разрабатываемого искробезопасного оборудования для опасных по газу шахт значительно сокращает сроки его внедрения с более достоверным соблюдением параметров искробезопасности и тем самым приводит к снижению риска возникновения взрыва и экзогенного пожара в шахте.

Ключевые слова: угольная промышленность, расчетные методы, оценка искробезопасности, энергия разряда, достоверность результатов.

Стаття надійшла до редакції 11.07.2019.

Рекомендовано до друку д-ром техн. наук Курносовим С.А.