

Witalij Skoropacki

ZALEŻNOŚCI ENERGETYCZNE PRZY ZAPEWNIENIU ISKROBEZPIECZEŃSTWA OBWODÓW ELEKTRYCZNYCH TYPU RC ZA POMOCĄ UKŁADÓW OCHRONNYCH O NIELINIOWEJ CHARAKTERYSTYCE WYJŚCIOWEJ

Streszczenie

Według dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 94/9/WE (ATEX 100A), poziom iskrobezpieczeństwa „ia”, nie może być uzyskany za pomocą stosowania sterowanych elementów półprzewodnikowych jako szeregowych ograniczników prądu. Stosowanie tych elementów natomiast jest dozwolone w postaci równoległych ograniczników napięcia jako zwerników zacisków wyjściowych źródła zasilania. Układ ochronny obwodu iskrobezpiecznego, zbudowany na tej zasadzie, ma nieliniową charakterystykę wyjściową. Z tej przyczyny aktualne staje się badanie efektywności zapewnienia iskrobezpieczeństwa układów ochronnych o nieliniowej charakterystyce wyjściowej z wykorzystaniem zależności energetycznych w okresie przejściowym.

W artykule zostało przedstawione to zagadnienie w zakresie analizy wydzielania energii w kanale wyładowania elektrycznego wskutek komutacji awaryjnej typu zwarcie w obwodzie RC. Do analizy tej energii wykorzystano kilka matematycznych modeli zmiany rezystancji kanału wyładowania – liniowej i nieliniowych.

Stwierdzono, że wydajność energetyczna procesu wyładowania, stanowiąca procentowy udział energii elektrycznej pochłanianej w kanale wyładowania w stosunku do pierwotnej energii zgromadzonej w kondensatorze, jest maksymalna dla liniowego modelu zmiany rezystancji kanału wyładowania elektrycznego oraz w początkowym okresie procesu wyładowania i przy minimalnej szybkości zmiany rezystancji kanału wyładowania elektrycznego. Efekt znaczącej redukcji energii pochłanianej w kanale wyładowania osiąga się w przypadku stosowania nieliniowego układu elektronicznego, zwierającego punkt iskrowego rozładowania kondensatora z jak najkrótszym opóźnieniem w stosunku do początku powstania procesu rozładowania, przy czym potencjalna wartość tej redukcji nie przewyższa 50% w przypadku stosowania progowych układów zabezpieczenia nadprądowego.

Wykazano, że rezystor szeregowo włączony w obwód rozładowania kondensatora staje się skutecznym, pod względem redukcji energii wydzielanej w kanale wyładowania, dla wartości tego rezystora powyżej 10 Ω , przy czym efekt redukcji nie jest stały dla kondensatorów o różnej pojemności. Z kolei, włączenie dodatkowego rezystora w przypadku zastosowania nieliniowego układu ochronnego zmniejsza w sposób wyraźny wartość energii elektrycznej wydzielanej w kanale wyładowania.

Istotne zmniejszenie tej energii osiąga się już przy wartości dodatkowego rezystora wynoszącej kilka omów. To oznacza, że zastosowanie nieliniowych układów ochronnych jest korzystniejsze niż z konwencjonalnych liniowych układów ochronnych, ponieważ w licznych przypadkach obecność takiego rezystora o dużej wartości koliduje z przeznaczeniem kondensatora, na przykład kiedy kondensator jest wykorzystywany jako element filtru wygładzającego.

Energy relations at assurance of spark-proofness of RC type electric circuits with the use of protective systems with non-linear output characteristics

Abstract

According to the directive of European Parliament and Council 94/9/WE (ATEX 100A), level "i_a" of sparkproofness, it can not be obtained with the use of applying of steered semiconducting elements as serial current limiters. However, applying of these elements is permissible in form of voltage parallel limiters, as short circuiting switches of output terminals of power supply. Protective system of sparkproof circuit, built according to this rule, possess a non-linear output characteristics. Because of this, efficiency

tests of sparkproofness assurance using energy relations for a transitory period become a live issue for the protective systems with non-linear output characteristics.

In the paper, this question was presented in the scope of analysis of energy releasing in channel of electric discharge resulting from emergency commutation of the short-circuit type in circuit RC . Some mathematical models of channel discharge resistance change, linear and non-linear, were used for analysis of this energy.

It was stated that an energetic efficiency of discharge process, constituting proportional part of electric energy absorbed in discharge channel in relation to prime energy accumulated in capacitor, is maximal for a linear model of resistance change of electric discharge channel, as well as in an initial period of discharge process and at minimal rate of resistance change of electric discharge channel. Effect of significant reduction of energy absorbed in the discharge channel is achieved in the case of applying of non-linear electronic system short-circuiting the point of sparkle discharge of capacitor within the shortest possible delay in relation to beginning of rise of the discharging process. At the same time, the potential value of this reduction is not higher than 50%, in the case of threshold systems applying for excess current protection.

It was shown, that resistor included in series in a capacitor discharging circuit becomes effective, with regard to reduction of energy releasing in channel of discharge, for values of its resistance above 10Ω , and the effect of reduction is not constant for capacitors of different capacities. Subsequently, inclusion of an additional resistor diminishes significantly the value of electric energy releasing in the channel of discharge in the case of use of the non-linear protective system.

Essential decrease of this energy is achieved already at additional resistance value of few ohms. This means that use of non-linear protective systems is more advantageous than the use of conventional linear protective systems, because in numerous cases the presence of such a resistor of large value interferes with a capacitor destination, for example when the capacitor is used as an element of smoothing filter.

WPROWADZENIE

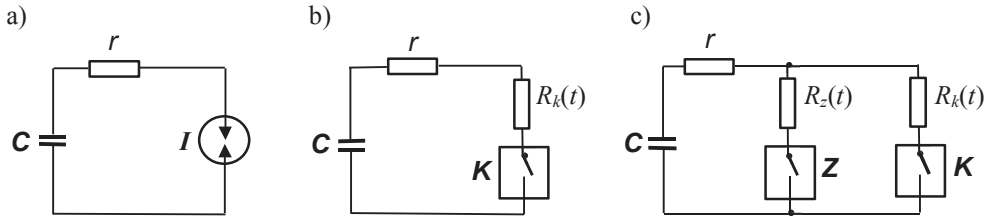
Wśród różnorodnych iskrobezpiecznych obwodów elektrycznych najbardziej rozpowszechnionymi są obwody RLC , których cechą charakterystyczną jest potencjalna zdolność do zapłonu mieszanin wybuchowych, tak przy wyładowaniu podczas komutacji awaryjnej typu rozwarcie, jak i przy zwarcie obwodu elektrycznego. Jednym ze sposobów zapewnienia iskrobezpieczeństwa tych obwodów jest energetyczna izolacja (odłączenie) źródła zasilania w chwili wystąpienia komutacji awaryjnej w obwodzie chronionym. Izolacja energetyczna jest dokonywana po przekroczeniu przez prąd w obwodzie elektrycznym wartości ustalonej warunkami iskrobezpieczeństwa, na przykład przy gwałtownym zmniejszeniu obciążenia z powodu zwarcia. Zapewnia to znaczące zwiększenie sprawności źródła zasilania i iskrobezpiecznej mocy oddawanej do obciążenia.

Według (IEC 60079-11 Ed. 5.0), poziom iskrobezpieczeństwa „i_a” nie może być uzyskany za pomocą sterowanych elementów półprzewodnikowych jako szeregowych ograniczników prądu. Stosowanie tych elementów jest natomiast dozwolone w postaci równoległych ograniczników napięcia jako zwierników zacisków wyjściowych źródła zasilania.

Z tej przyczyny aktualne staje się badanie efektywności zapewnienia iskrobezpieczeństwa układów ochronnych o nieliniowej charakterystyce wyjściowej z wykorzystaniem zależności energetycznych w okresie przejściowym. W artykule zostało przedstawione to zagadnienie w zakresie analizy wydzielania energii w kanale wyładowania elektrycznego wskutek komutacji awaryjnej, typu zwarcie w obwodzie RC . Do analizy tej energii wykorzystano kilka matematycznych modeli zmiany rezystancji kanału wyładowania – liniowej i nieliniowych.

1. ZALEŻNOŚCI ENERGETYCZNE PODCZAS ISKROWEGO ROZŁADOWANIA KONDENSATORA

Kondensator o pojemności C jest naładowany do napięcia U_{C_0} . Kondensator, jako pasywne źródło energii, w warunkach rzeczywistych charakteryzuje się własną rezystancją strat i rezystancją upływności. Załóżmy, że kondensator jest rozładowywany przez własną rezystancję strat r za pomocą iskiernika I (rys. 1a). W celu jej uproszczenia przedstawimy iskiernik w postaci szeregowego połączenia idealnego klucza i rezystancji kanału rozładowania $R_k(t)$ (rys. 1b).



Rys. 1. Układy rozładowania kondensatora

Fig. 1. Capacitor discharging circuits

Prąd rozładowania jest równy

$$i(t) = -\frac{U_{C_0}}{r + R_k(t)} e^{-t\delta(t)} \quad (1)$$

gdzie $\delta(t)$ jest współczynnikiem tłumienia

$$\delta(t) = \frac{1}{r + R_k(t) C} \quad (2)$$

Wartość chwilowa aktywnej mocy $P_k(t)$, wydzielonej w kanale wyładowania elektrycznego, jest równa

$$P_k(t) = \frac{U_{C_0}^2 R_k(t)}{r + R_k(t)} e^{-2t\delta(t)} \quad (3)$$

Jeżeli założy się, że $R_k(t) = \text{const} = R_k$, to energia W_k pochłaniana w kanale wyładowania elektrycznego jest równa

$$W_k = \int_0^{t_w} P_k(t) dt = \int_0^{t_w} \frac{U_{C_0}^2 R_k}{r + R_k} e^{-\frac{2t}{\tau}} dt = \frac{U_{C_0}^2 R_k \tau}{2(r + R_k)} \left(1 - e^{-\frac{2t_w}{\tau}}\right) \quad (4)$$

gdzie:

$\tau = (r + R_k)C$ – stała czasowa obwodu wyładowania,

$0 - t_w$ – przedział czasu wyładowania elektrycznego.

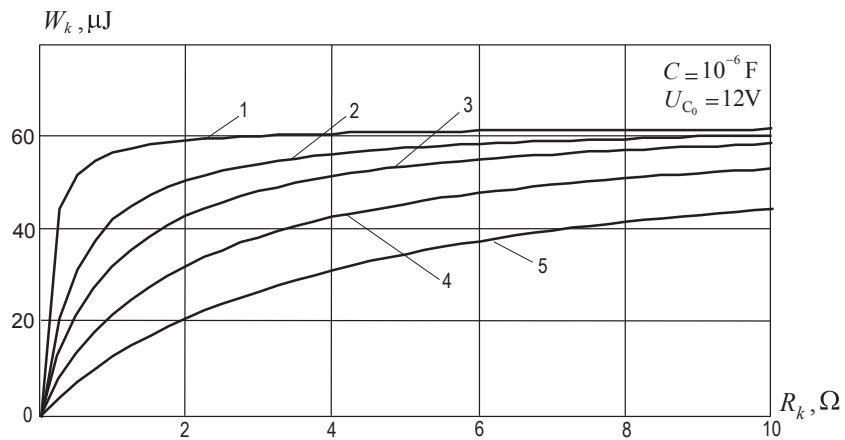
Ze wzoru (4) wynika, że dla idealnego kondensatora ($r = 0$) w skrajnym przypadku, tzn. przy $R_k \rightarrow \infty$, stała czasowa obwodu rozładowania $t_w \rightarrow \infty$, a energia W_k dąży do wartości energii zgromadzonej w kondensatorze, tzn. $W_k \rightarrow 0,5 U_{C_0}^2 C$.

Ponieważ energia zgromadzona w kondensatorze, jako pasywnym źródle energii elektrycznej, jest konieczna, to $t_w < \tau$. Uwzględniając najbardziej niekorzystny, pod względem iskrobezpieczeństwa, tryb rozładowania kondensatora, w celu uproszczenia analizy można założyć, że czas wyładowania elektrycznego jest równy stałej czasowej obwodu rozładowania, tzn. $t_w = \tau$.

Można więc zapisać

$$W_k = \frac{U_{C_0}^2 R_k \tau}{2 \sqrt{r^2 + R_k^2}} \left(-e^{-2} \right) \approx \frac{0,43 U_{C_0}^2 R_k C}{r + R_k} \quad (5)$$

Wyniki obliczenia zależności $W_k(R_k)$ dla kondensatora o pojemności $C = 10 \mu\text{F}$ i $U_{C_0} = 12 \text{ V}$ zilustrowano wykresami (rys. 2).



Rys. 2. Wykresy zależności wartości energii wyładowania W_k od rezystancji kanału wyładowania R_k :
1 – dla $r = 0,1 \Omega$; 2 – dla $r = 0,5 \Omega$; 3 – dla $r = 1 \Omega$; 4 – dla $r = 2 \Omega$; 5 dla $r = 4 \Omega$

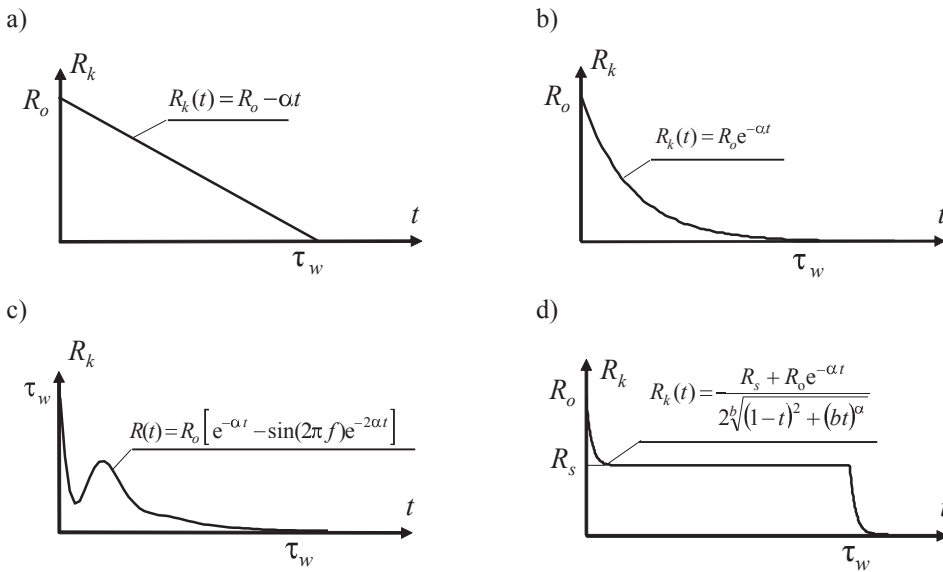
Fig. 2. Plots of dependence of discharge energy values W_k on the resistance R_k of discharge channel:
1 – for $r = 0,1 \Omega$; 2 – for $r = 0,5 \Omega$; 3 – for $r = 1 \Omega$; 4 – for $r = 2 \Omega$; 5 – for $r = 4 \Omega$

Z rysunku wynika, że przy założeniu najbardziej niekorzystnego pod względem iskrobezpieczeństwa procesu wyładowania elektrycznego, polegającego na tym że czas wyładowania jest równy stałej czasowej elektrycznego obwodu rozładowania, maksymalną wartość energii elektrycznej pochłanianej w kanale wyładowania osiąga się przy $R_k \gg r$, w odróżnieniu od zasady dopasowania rezystancji obciążenia do wewnętrznej rezystancji aktywnego źródła energii elektrycznej, celem odbierania maksymalnej energii przez obciążenie. W warunkach rzeczywistych $t_w < \tau$ ponieważ wyładowanie elektryczne zanika przy zmniejszeniu napięcia w punkcie wyładowania do określonej, progowej wartości niezbędnej do podtrzymania wyładowania.

Z kolei, rezystancja kanału wyładowania w rzeczywistości zmienia się w czasie. Oczywiście jest, że dla $0 \leq t \leq t_w$ obwód elektryczny znajduje się w stanie przejściowym, a przed powstaniem komutacji awaryjnej i po upływie czasu $t \geq t_w$ obwód jest w stanie ustalonym. Przy powstaniu zwarcia za pomocą klucza K (rys. 1b) prąd i napięcia w kanale rozładowania wynoszą

$$\left. \begin{aligned} I_k &= 0, & U_k &= U_{C_0}, & R_k &= \infty & \text{dla } t &= 0 \\ I_k &= I_k(t), & U_k &= U_k(t), & R_k &= R_k(t) & \text{dla } 0 &\leq t \leq t_w \\ I_k &= 0, & U_k &= 0, & R_k &= 0 & \text{dla } t &> t_w \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Charakter zmiany $R_k(t)$ dla $0 \leq t \leq t_w$ nie jest znany. Na rysunku 3 podano kilka możliwych wariantów przebiegu funkcji $R_k(t)$ w procesie wyładowania.



Rys. 3. Warianty przebiegu funkcji $R_k(t)$ w procesie wyładowania
Fig. 3. Variants of course of function $R_k(t)$ in the process of discharge

Przy liniowej zmianie rezystancji kanału wyładowania w czasie (rys. 3a), energia W_{k_1} pochłaniana w tym kanale jest równa

$$W_{k_1} = \int_0^{t_w} \frac{U_{k_1}^2(t) R_k(t)}{[r + R_k(t)]^2} \exp\left\{-\frac{2t}{[r + R_k(t)]C}\right\} dt \quad (7)$$

gdzie $R_k(t) = R_0 - \alpha t$

W przypadku wykładniczego charakteru zmiany rezystancji kanału wyładowania (rys. 3b), energia W_{k_2} pochłaniana w kanale jest równa

$$W_{k_2} = \int_0^{t_w} \frac{U_{k_2}^2(t) R_k(t)}{[r + R_k(t)]^2} \exp\left\{-\frac{2t}{[r + R_k(t)]C}\right\} dt \quad (8)$$

przy czym w tym przypadku $R_k(t) = R_0 \exp(-at)$

W innych przypadkach (rys. 3 c i d)

$$W_{k_3} = \int_0^{t_w} \frac{U_{k_3}^2(t) R_k(t)}{[r + R_k(t)]^2} \exp\left\{-\frac{2t}{[r + R_k(t)]C}\right\} dt \quad (9)$$

gdzie $R_k(t) = R_0 \left[\exp(-\alpha t) - \sin(\pi f) \exp(-2\alpha t) \right]$

$$W_{k_4} = \int_0^{t_w} \frac{U_{k_4}^2(t) R_k(t)}{[r + R_k(t)]^2} \exp\left\{-\frac{2t}{[r + R_k(t)]C}\right\} dt \quad (10)$$

gdzie $R_k(t) = R_0 [\exp(-\alpha t)] + R_s \sqrt{2\sqrt{(-t)^\alpha + (t)^\alpha}}$

We wzorach (7) – (10) $U_{k_i}(t)$ jest funkcją zmiany napięcia w punkcie wyładowania elektrycznego. Rozwiązanie całek (7) – (10) w sposób analityczny jest zagadnieniem niezwykle złożonym. Z tej przyczyny całki te obliczono w sposób numeryczny z wykorzystaniem aproksymacji rezystancji kanału wyładowania elektrycznego za pomocą funkcji schodkowej $f(\uparrow t)$. Funkcję schodkową, odpowiadającą funkcji $R_k(t)$, określa się jako (Osowski 1981)

$$f(\uparrow t) = R_k(n) \quad \text{dla } n \leq t < n+1, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (11)$$

przy czym $\uparrow t = n$ dla $n \leq t < n+1, \quad n = 0, 1, 2, \dots$

Funkcja schodkowa $f(\uparrow t)$ jest całkowicie określona, gdy jest znany ciąg $\{R_{k_n}\} = \{R_k(n)\}$ wartości funkcji $R_k(t)$ w punktach $t = n, \quad n = 0, 1, 2, \dots$. Można zapisać

$$\left. \begin{aligned} R_{k_0}(t) &= \text{const} = R_{k_0} && \text{dla } 0 \leq t \leq t_1 \\ R_{k_1}(t) &= \text{const} = R_{k_0} - a && \text{dla } t_1 \leq t \leq t_2 \\ &\vdots && \\ R_{k_n}(t) &= \text{const} = R_{k_0} - na && \text{dla } t_n \leq t \leq t_{n+1} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Przy zwiększaniu liczby możliwych wartości funkcji $R_k(t)$ drogą zwiększenia n , funkcja ułamkowa schodkowa zbliża się do funkcji aproksymowanej.

Wartości chwilowe aktywnej mocy $P_k(t)$ wydzielanej w kanale wyładowania elektrycznego są równe

$$U_{C_1} = U_{C_0} e^{-\frac{t}{\tau_1}} \Big|_{t=t_1} ; U_{C_2} = U_{C_1} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \Big|_{t=t_2} ; \dots ; U_{C_{(n-1)}} = U_{C_{(n-2)}} e^{-\frac{t}{\tau_{(n-1)}}} \Big|_{t=t_{n-1}} ,$$

$$\left. \begin{aligned} P_{k_1}(t) &= \frac{U_{C_0}^2 e^{-\frac{2t}{\tau_1}}}{(r + R_o - a)^2} (R_o - \alpha) & \text{dla } 0 \leq t \leq t_1 \\ P_{k_1}(t) &= \frac{U_{C_0}^2 e^{-\frac{2t}{\tau_1}}}{(r + R_o - a)^2} (R_o - \alpha) & \text{dla } t_1 \leq t \leq \\ & \vdots \\ P_{k_n}(t) &= \frac{U_{C_{n-1}}^2 e^{-\frac{2t}{\tau_n}}}{(r + R_o - na)^2} (R_o - n\alpha) & \text{dla } t_{n-1} \leq t \leq t_n \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

gdzie $\tau_1 = [r + (R_o - \alpha)]C$, $\tau_2 = [r + (R_o - 2\alpha)]C$, ..., $\tau_n = [r + (R_o - n\alpha)]C$.

Energia elektryczna W_k pochłaniana w tym kanale jest równa $W_k = \sum_{i=1}^n W_{k_i}$,

przy czym

$$W_{k_i} = \frac{U_{C_{i-1}}^2 (R_o - i\alpha)}{(r + R_o - i\alpha)^2} \int_{t_{i-1}}^{t_i} e^{-\frac{2t}{\tau_i}} dt, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad \text{dla } t_{i-1} \leq t \leq t_i \quad (14)$$

lub

$$W_{k_i} = \frac{U_{C_{i-1}}^2 (R_o - i\alpha)C}{2(r + R_o - i\alpha)} \left\{ e^{-\frac{2t_{i-1}}{(r+R_o-i\alpha)C}} - e^{-\frac{2t_i}{(r+R_o-i\alpha)C}} \right\}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad \text{dla } t_{i-1} \leq t \leq t_i \quad (15)$$

W tablicach 1–4 przedstawiono wyniki obliczeń wartości energii $W_k(\alpha)$, wydzielanej w kanale wyładowania elektrycznego oraz wydajności procesu wyładowania, $\eta(\alpha) = [2W_k / U_{C_0}^2 C] \cdot 100\%$, odpowiadającej procentowemu udziałowi energii elektrycznej pochłanianej w kanale wyładowania w stosunku do pierwotnej energii zgromadzonej w kondensatorze, w zależności od parametru α dla różnych przebiegów zmiany rezystancji kanału wyładowania.

Tablica 1. Wartości energii $W_k(a)$, wydzielanej w kanale wylądowania oraz wydajności $\eta(a)$ – w zależności od parametru a , przy zmianie rezystancji kanału wylądowania według funkcji przedstawionej na rysunku 3a

$U_{c_0} = 12 \text{ V}$ $r = 0,1 \Omega$ $R_o = 10^5 \Omega$			$R_k(t) = R_o - \alpha t$							
			$a, \Omega/s$							
			10	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7	10^8
C, F	10^{-6}	$W_k, \text{ J}$	$7,20 \cdot 10^{-5}$	$7,19 \cdot 10^{-5}$	$7,18 \cdot 10^{-5}$	$7,16 \cdot 10^{-5}$	$6,87 \cdot 10^{-5}$	$5,20 \cdot 10^{-5}$	$2,15 \cdot 10^{-5}$	$4,93 \cdot 10^{-6}$
		$\eta, \%$	99,9	99,9	99,7	99,5	95,4	72,3	29,9	6,84
	10^{-5}	$W_k, \text{ J}$	$7,20 \cdot 10^{-4}$	$7,16 \cdot 10^{-4}$	$7,19 \cdot 10^{-4}$	$6,87 \cdot 10^{-4}$	$5,20 \cdot 10^{-4}$	$2,15 \cdot 10^{-4}$	$4,93 \cdot 10^{-5}$	$8,15 \cdot 10^{-6}$
		$\eta, \%$	99,9	99,9	99,5	95,4	72,3	29,9	6,84	1,13
	10^{-4}	$W_k, \text{ J}$	$7,19 \cdot 10^{-3}$	$7,16 \cdot 10^{-3}$	$6,87 \cdot 10^{-3}$	$5,20 \cdot 10^{-3}$	$2,15 \cdot 10^{-3}$	$4,93 \cdot 10^{-4}$	$8,15 \cdot 10^{-5}$	$1,14 \cdot 10^{-5}$
		$\eta, \%$	99,9	99,5	95,4	72,3	29,9	6,84	1,13	0,16
	10^{-3}	$W_k, \text{ J}$	$72,0 \cdot 10^{-3}$	$69,0 \cdot 10^{-3}$	$59,2 \cdot 10^{-3}$	$21,9 \cdot 10^{-3}$	$4,93 \cdot 10^{-3}$	$8,15 \cdot 10^{-4}$	$1,15 \cdot 10^{-4}$	$1,21 \cdot 10^{-5}$
		$\eta, \%$	99,5	99,4	72,3	29,9	6,84	1,13	0,16	0,02

Tablica 2. Wartości energii $W_k(a)$, wydzielanej w kanale wylądowania oraz wydajności $\eta(a)$ – w zależności od parametru a , przy zmianie rezystancji kanału wylądowania według funkcji przedstawionej na rysunku 3b

$U_{c_0} = 12 \text{ V}$ $r = 0,1 \Omega$ $R_o = 10^5 \Omega$			$R_k(t) = R_o \exp(-\alpha t)$							
			$a, \Omega/s$							
			10	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7	10^8
C, F	10^{-6}	$W_k, \text{ J}$	$5,66 \cdot 10^{-5}$	$3,66 \cdot 10^{-5}$	$2,22 \cdot 10^{-5}$	$1,45 \cdot 10^{-5}$	$1,04 \cdot 10^{-5}$	$8,01 \cdot 10^{-6}$	$6,45 \cdot 10^{-6}$	$4,89 \cdot 10^{-6}$
		$\eta, \%$	78,6	50,9	30,8	20,1	14,4	11,1	8,96	6,80
	10^{-5}	$W_k, \text{ J}$	$3,66 \cdot 10^{-4}$	$2,22 \cdot 10^{-4}$	$1,45 \cdot 10^{-4}$	$1,04 \cdot 10^{-4}$	$8,01 \cdot 10^{-5}$	$6,46 \cdot 10^{-5}$	$4,89 \cdot 10^{-5}$	$1,23 \cdot 10^{-5}$
		$\eta, \%$	50,9	30,8	20,1	14,4	11,1	8,96	6,80	1,71
	10^{-4}	$W_k, \text{ J}$	$2,22 \cdot 10^{-3}$	$1,45 \cdot 10^{-3}$	$1,04 \cdot 10^{-3}$	$8,01 \cdot 10^{-4}$	$6,47 \cdot 10^{-4}$	$4,90 \cdot 10^{-4}$	$1,25 \cdot 10^{-4}$	$1,41 \cdot 10^{-5}$
		$\eta, \%$	30,8	20,1	14,4	11,1	8,96	6,81	1,73	0,19
	10^{-3}	$W_k, \text{ J}$	$14,0 \cdot 10^{-3}$	$10,0 \cdot 10^{-3}$	$8,01 \cdot 10^{-3}$	$6,45 \cdot 10^{-3}$	$4,90 \cdot 10^{-3}$	$1,25 \cdot 10^{-3}$	$1,41 \cdot 10^{-4}$	$1,43 \cdot 10^{-5}$
		$\eta, \%$	20,1	14,4	11,1	8,96	6,81	1,73	0,19	0,02

Tablica 3. Wartości energii $W_k(a)$, wydzielanej w kanale wylądowania oraz wydajności $\eta(a)$ – w zależności od parametru a , przy zmianie rezystancji kanału wylądowania według funkcji przedstawionej na rysunku 3c

$U_{c_0} = 12 \text{ V}$ $r = 0,1 \Omega$ $R_o = 10^5 \Omega$			$R_k(t) = R_o \left[\exp(-\alpha t) - \sin(\pi f t) \exp(-2\alpha t) \right]$										
			$a, \Omega/s$										
			10	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7	10^8			
C, F	10^{-6}	$W_k, \text{ J}$	$f, \text{ Hz}$	10	$6,18 \cdot 10^{-5}$	$3,82 \cdot 10^{-5}$	$2,23 \cdot 10^{-5}$	$1,45 \cdot 10^{-5}$	$1,04 \cdot 10^{-5}$	$8,01 \cdot 10^{-6}$	$6,45 \cdot 10^{-6}$	$4,90 \cdot 10^{-6}$	
			100	$4,83 \cdot 10^{-5}$	$4,56 \cdot 10^{-5}$	$2,38 \cdot 10^{-5}$	$1,45 \cdot 10^{-5}$	$1,04 \cdot 10^{-5}$	$8,01 \cdot 10^{-6}$	$6,45 \cdot 10^{-6}$	$4,90 \cdot 10^{-6}$		
		$\eta, \%$	$f, \text{ Hz}$	10	85,9	53,1	31,0	20,1	14,4	11,1	8,96	6,80	
			100	67,2	63,6	33,1	20,1	14,4	11,1	8,96	6,80		
		10^{-5}	$W_k, \text{ J}$	$f, \text{ Hz}$	10	$4,58 \cdot 10^{-4}$	$2,35 \cdot 10^{-4}$	$1,45 \cdot 10^{-4}$	$1,04 \cdot 10^{-4}$	$8,01 \cdot 10^{-5}$	$6,45 \cdot 10^{-5}$	$3,59 \cdot 10^{-5}$	$1,23 \cdot 10^{-5}$
				100	$3,88 \cdot 10^{-4}$	$2,35 \cdot 10^{-4}$	$1,48 \cdot 10^{-4}$	$1,04 \cdot 10^{-4}$	$8,01 \cdot 10^{-5}$	$6,45 \cdot 10^{-5}$	$3,59 \cdot 10^{-5}$	$1,23 \cdot 10^{-5}$	
	$\eta, \%$		$f, \text{ Hz}$	10	63,6	32,6	20,2	14,4	11,1	8,96	4,99	1,71	
			100	53,9	32,6	20,6	14,4	11,1	8,96	4,99	1,71		
	10^{-4}		$W_k, \text{ J}$	$f, \text{ Hz}$	10	$2,35 \cdot 10^{-3}$	$1,48 \cdot 10^{-3}$	$1,04 \cdot 10^{-3}$	$8,01 \cdot 10^{-4}$	$6,45 \cdot 10^{-4}$	$4,90 \cdot 10^{-4}$	$1,24 \cdot 10^{-4}$	$1,41 \cdot 10^{-5}$
				100	$2,31 \cdot 10^{-3}$	$1,46 \cdot 10^{-3}$	$1,04 \cdot 10^{-3}$	$8,01 \cdot 10^{-4}$	$6,45 \cdot 10^{-4}$	$4,90 \cdot 10^{-4}$	$1,24 \cdot 10^{-4}$	$1,41 \cdot 10^{-5}$	
		$\eta, \%$	$f, \text{ Hz}$	10	32,7	20,6	14,4	11,1	8,96	6,81	1,72	0,19	
			100	32,2	20,2	14,4	11,1	8,96	6,81	1,72	0,19		
		10^{-3}	$W_k, \text{ J}$	$f, \text{ Hz}$	10	$15,0 \cdot 10^{-3}$	$10,0 \cdot 10^{-3}$	$7,92 \cdot 10^{-3}$	$6,45 \cdot 10^{-3}$	$4,89 \cdot 10^{-3}$	$1,25 \cdot 10^{-3}$	$1,03 \cdot 10^{-4}$	$5,07 \cdot 10^{-5}$
				100	$15,0 \cdot 10^{-3}$	$10,0 \cdot 10^{-3}$	$7,92 \cdot 10^{-3}$	$6,45 \cdot 10^{-3}$	$4,89 \cdot 10^{-3}$	$1,25 \cdot 10^{-3}$	$1,03 \cdot 10^{-4}$	$5,07 \cdot 10^{-5}$	
	$\eta, \%$		$f, \text{ Hz}$	10	20,3	14,5	11,0	8,96	6,80	1,73	0,14	0,07	
			100	20,3	14,5	11,0	8,96	6,80	1,73	0,14	0,07		

Tablica 4. Wartości energii $W_k(a)$, wydzielanej w kanale wyładowania oraz wydajności $\eta(a)$ – w zależności od parametru a , przy zmianie rezystancji kanału wyładowania według funkcji przedstawionej na rysunku 3d

$U_{c_0} = 12 \text{ V}$ $r = 0,1 \text{ } \Omega$ $R_o = 10^5 \text{ } \Omega$ $R_s = 10^4 \text{ } \Omega$		$R_k(t) = R_o[\exp(-at)] + R_s \sqrt{2} \sqrt{(-t)^2 + at}$								
		$a, \text{ } \Omega/\text{s}$								
		10	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7	10^8	
C, F	10^{-6}	$W_k, \text{ J}$	$5,64 \cdot 10^{-5}$	$6,42 \cdot 10^{-5}$	$6,49 \cdot 10^{-5}$	$6,58 \cdot 10^{-5}$	$6,58 \cdot 10^{-5}$	$6,58 \cdot 10^{-5}$	$6,58 \cdot 10^{-5}$	$6,58 \cdot 10^{-5}$
		$\eta, \%$	78,3	89,2	90,2	91,4	91,4	91,4	91,4	91,4
	10^{-5}	$W_k, \text{ J}$	$5,21 \cdot 10^{-4}$	$6,31 \cdot 10^{-4}$	$6,45 \cdot 10^{-4}$	$6,46 \cdot 10^{-4}$	$6,49 \cdot 10^{-4}$	$6,49 \cdot 10^{-4}$	$6,49 \cdot 10^{-4}$	$6,49 \cdot 10^{-4}$
		$\eta, \%$	72,4	87,6	89,6	89,8	90,2	90,2	90,2	90,2
	10^{-4}	$W_k, \text{ J}$	$4,43 \cdot 10^{-3}$	$5,93 \cdot 10^{-3}$	$6,06 \cdot 10^{-3}$	$6,09 \cdot 10^{-3}$	$6,09 \cdot 10^{-3}$	$6,13 \cdot 10^{-3}$	$6,15 \cdot 10^{-3}$	$6,15 \cdot 10^{-3}$
		$\eta, \%$	61,6	82,4	84,2	84,6	84,6	85,2	85,4	85,4
	10^{-3}	$W_k, \text{ J}$	$4,08 \cdot 10^{-2}$	$4,91 \cdot 10^{-2}$	$5,05 \cdot 10^{-2}$	$5,19 \cdot 10^{-2}$	$5,23 \cdot 10^{-2}$	$5,23 \cdot 10^{-2}$	$5,24 \cdot 10^{-2}$	$5,24 \cdot 10^{-2}$
		$\eta, \%$	56,6	68,2	70,1	72,2	72,6	72,7	72,8	72,8

Można stwierdzić, że symulacja kanału wyładowania elektrycznego z wykorzystaniem funkcji liniowej $R_k(t) = R_o - at$ zapewnia maksymalną wartość energii elektrycznej pochłanianej w kanale wyładowania, tzn. najbardziej niekorzystny, pod względem iskrobezpieczeństwa, proces przejściowy.

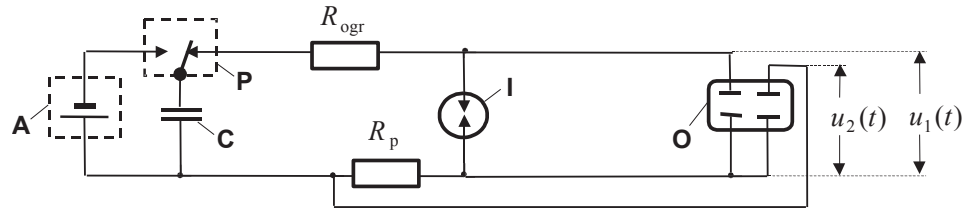
Wydajność energetyczna procesu wyładowania η , odpowiadająca procentowemu udziałowi energii elektrycznej pochłanianej w kanale wyładowania w stosunku do pierwotnej energii zgromadzonej w kondensatorze, jest maksymalna dla modelu liniowego zmiany rezystancji kanału.

Badania charakteru i parametrów wyładowań prowadziło wielu naukowców, a pierwsze modele matematyczne przestrzeni międzyelektrodowej w procesie wyładowania elektrycznego stworzyli Kravtchenko (Kravtchenko i inni 1976) i Grzywak (1969). W modelu liniowym przestrzeni międzyelektrodowej (Osowski 1981) przyjęto założenie, że prąd w czasie rozwierania maleje, natomiast w modelu przedstawionym w publikacji (Kravtchenko i inni 1976) – że w okresie przerywania prądu powierzchnia styku zmniejsza się liniowo do zera.

Można stwierdzić, że symulacja rezystancji kanału wyładowania elektrycznego podczas zwarcia w obwodzie RC , za pomocą funkcji liniowej, w stopniu maksymalnym jest zbliżona do realnego procesu wydzielania energii w tym kanale, zapewnia najprostsze obliczenia inżynierskie w analitycznej ocenie iskrobezpieczeństwa i będzie wykorzystana w dalszych rozważaniach.

Należy również podkreślić, że przy rozładowaniu kondensatora energia elektryczna W_k pochłaniana w kanale wyładowania jest maksymalna w przypadku małej szybkości zmiany rezystancji tego kanału, w początkowym okresie procesu wyładowania, tzn. kiedy $R_k(t) \gg r$. A więc, rezystancja własnych strat kondensatora ma nieistotny wpływ na wartość energii pochłanianej w kanale wyładowania. Energię tę można zmniejszyć za pomocą szeregowego włączenia rezystora ograniczającego. Wartość tego rezystora powinna być określana w każdym konkretnym przypadku, w zależności od pojemności kondensatora C , jego przeznaczenia i napięcia U_{c_0} . Na przykład, włączenie szeregowego rezystora o wartości od 0,1 do 10 Ω nie zmniejsza w sposób wyraźny wartości energii oddawanej do kanału wyładowania elektrycznego kondensatorem o pojemności 100 μF . W tym przypadku

istotne zmniejszenie tej energii osiąga się dla dodatkowego rezystora o wartości powyżej kilkudziesięciu Ω . Potwierdziły to pomiary eksperymentalne wykonane z wykorzystaniem dwukanałowego cyfrowego oscyloskopu Tektronix TDS5032B (rys. 4).



Rys. 4. Schemat pomiaru energii elektrycznej wydzielanej w kanale wyładowania: ŻŻ – źródło zasilania, UO – układ ochronny, I – iskiernik, O – oscyloskop, A – akumulator, P – przełącznik, C – kondensator

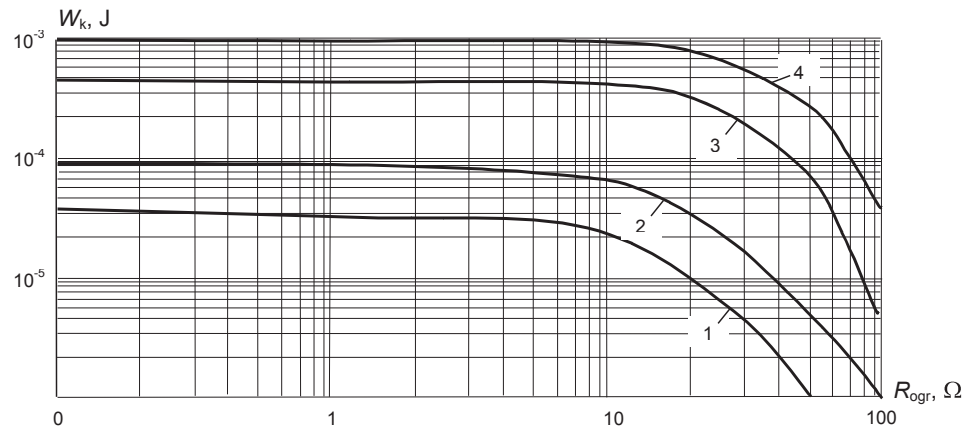
Fig. 4. Layout of measurement of electric energy releasing in a channel of discharge: ŻŻ – power supply, UO – protective system, I – spark gap, O – oscilloscope, A – accumulator, P – switch, C – capacitor

Wartość energii elektrycznej W_k wydzielonej w kanale wyładowania elektrycznego jest równa

$$W_k = \frac{1}{R_p} \int_0^{\tau_w} u_1(t)u_2(t) dt \quad (16)$$

gdzie R_p – wartość rezystora pomiarowego (pożądana jest możliwie najmniejsza, wynikająca z maksymalnej czułości oscyloskopu).

Na rysunku 5 przedstawiono krzywe charakteryzujące zależność wartości energii W_k wydzielonej w kanale wyładowania elektrycznego od wartości rezystora ograniczającego R_{ogr} , dla różnych pojemności kondensatora C i wartości napięcia naładowania U_{C_0} .



Rys. 5. Energia wydzielana w kanale wyładowania elektrycznego W_k dla różnych wartości rezystora ograniczającego R_{ogr} : 1 – $C = 100 \mu F$, $U_{C_0} = 12 V$; 2 – $C = 1000 \mu F$, $U_{C_0} = 12 V$; 3 – $C = 1000 \mu F$, $U_{C_0} = 12 V$; 4 – $C = 1000 \mu F$, $U_{C_0} = 24 V$

Fig. 5. Energy releasing in a channel of electric discharge W_w for different values of restrictive resistor R_{ogr} : 1 – $C = 100 \mu F$, $U_{C_0} = 12 V$; 2 – $C = 1000 \mu F$, $U_{C_0} = 12 V$; 3 – $C = 1000 \mu F$, $U_{C_0} = 12 V$; 4 – $C = 1000 \mu F$, $U_{C_0} = 24 V$

3. ZALEŻNOŚCI ENERGETYCZNE PODCZAS ISKROWEGO ROZŁADOWANIA KONDENSATORA W OBECNOŚCI UKŁADU OCHRONNEGO TYPU ZWIERNIK

Jeżeli założy się, że kondensator jest rozładowywany przez równoległe połączone klucz K , symulujący punkt komutacji awaryjnej (zwarcie) i drugi klucz Z (zwiernik), symulujący układ ochronny o nieliniowej charakterystyce wyjściowej (rys. 1c), to przy takim uproszczeniu prąd rozładowania jest równy

$$i(t) = -\frac{U_{C_0}}{R_r(t)} e^{-t\delta(t)} \quad (17)$$

gdzie $R_r(t)$ – rezystancja sumaryczna obwodu rozładowania kondensatora

$$R_r(t) = r + \frac{R_k(t)R_z(t)}{R_k(t) + R_z(t)} \quad (18)$$

a współczynnik tłumienia $\delta(t)$ jest równy $\delta(t) = 1/R_r(t)C$.

Celowe jest, aby większa część energii elektrycznej zgromadzonej w kondensatorze C była wydzielona na rezystancji $R_z(t)$. Wartość tej energii jest zależna od stosunku $\eta = R_k(t)/R_z(t)$ i od czasu zadziałania układu ochronnego τ_o , licząc od chwili zadziałania klucza K , tzn. od chwili powstania komutacji awaryjnej.

A priori można stwierdzić, że w przypadku kiedy $R_k(t) = R_z(t)$, to wartości energii wydzielonej na rezystancji $R_k(t)$ i $R_z(t)$ są równe, tzn. że wartość energii wydzielonej w kanale wyładowania elektrycznego będzie o połowę mniejsza w porównaniu z przypadkiem rozładowania kondensatora bez układu ochronnego w postaci zwiernika Z (rys. 1b).

W rzeczywistości nie jest możliwe natychmiastowe zadziałanie układu ochronnego w chwili powstania komutacji awaryjnej, tzn. że klucz Z , symulujący zwiernik, zawsze będzie realizował zwarcie z opóźnieniem τ_o , w stosunku do klucza K . Przyczyna występowania opóźnienia τ_o wynika z fizyki działania półprzewodnikowego klucza jako zwiernika, który przechodzi w stan nasycenia w chwili przekroczenia na rezystorze pomiarowym wartości spadku napięcia progu zaporowego złącza bramka – katoda (tzw. napięcia wyzwalającego) elementu półprzewodnikowego, tranzystora lub tyrystora. W warunkach rzeczywistych dla większości elementów półprzewodnikowych wartość napięcia wyzwalającego mieści się w zakresie od 0,4 do 1,5 V w temperaturze otoczenia 20°C.

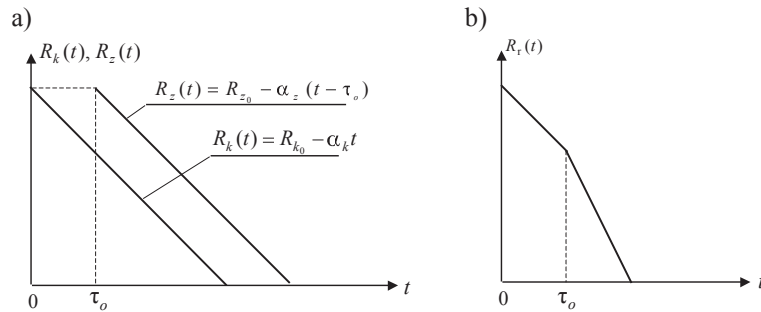
Napięcie w kanale rozładowania $U_k(t)$ podczas wyładowania elektrycznego zmienia się jako

$$U_k(t) = \frac{U_{C_0} R_k(t) R_z(t)}{r[R_k(t) + R_z(t)] + R_k(t) R_z(t)} \exp \left[-t\delta(t) \right] \quad (19)$$

Energia W_k pochłaniana w kanale wyładowania elektrycznego jest równa

$$W_k = U_{C_0}^2 \int_0^{t_w} \frac{R_k(t)R_z^2(t)}{[R_k(t) + R_z(t)] + R_k(t)R_z(t)} \exp[-2t\delta(t)] dt \quad (20)$$

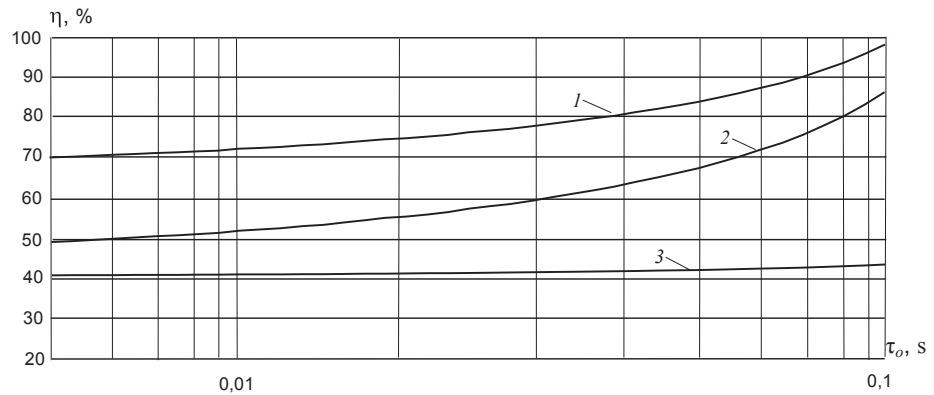
Jeżeli założy się, że $R_k(t) = R_{k_0} - \alpha_k t$ i $R_z(t) = R_{z_0} - \alpha_z(t - \tau_o)$ (rys. 4a), wtedy można zapisać (rys. 6b)



Rys. 6. Symulacja przebiegów funkcji $R_k(t)$, $R_z(t)$ i $R_r(t)$ w procesie wyładowania elektrycznego
Fig. 6. Simulation of courses of functions $R_k(t)$, $R_z(t)$ and $R_r(t)$ in the process of electric discharge

$$\left. \begin{aligned} R_r(t) &= R_k(t) = R_{k_0} - \alpha_k t && \text{dla } 0 < t \leq \tau_o \\ R_r(t) &= \frac{(R_{k_0} - \alpha_k t)[R_{z_0} - \alpha_z(t - \tau)]}{(R_{k_0} - \alpha_k t) + [R_{z_0} - \alpha_z(t - \tau)]} && \text{dla } \tau_o < t \leq \tau_w \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

Na rysunku 7 przedstawiono wykresy charakteryzujące zależność wydajności procesu wyładowania η od parametru τ_o , dla $R_{k_0} = R_{z_0} = 10^5 \Omega$, $\alpha_k = \alpha_z = 10^5 \Omega/s$ oraz dla różnych pojemności kondensatora C .



Rys. 7. Zależność wydajności procesu wyładowania elektrycznego η od parametru τ_o :
 1 – dla $C = 10^{-7}$ F, 2 – dla $C = 10^{-6}$ F, 3 – dla $C = 10^{-5}$ F

Fig. 7. Dependence of efficiency η of the process of electric discharge on a parameter τ_o :
 1 – for $C = 10^{-7}$ F, 2 – for $C = 10^{-6}$ F, 3 – for $C = 10^{-5}$ F

Wynika stąd, że w przypadku większej pojemności kondensatora C wartość opóźnienia τ_o nie ma istotnego wpływu na wydajność procesu wyładowania elektrycznego, jeżeli $\tau_o \ll t_w$. Przy tym wartość energii wydzielonej w kanale wyładowania elektrycznego nie przewyższa 50% wartości energii zgromadzonej w kondensatorze.

Należy podkreślić, że stosowanie dodatkowego rezystora, szeregowo włączonego w obwód rozładowania kondensatora, w przypadku zastosowania nieliniowego układu ochronnego, nie zmniejsza w sposób wyraźny wartości energii oddawanej do kanału wyładowania elektrycznego. Istotne zmniejszenie tej energii osiąga się w przypadku zastosowania dodatkowego rezystora o wartości powyżej kilkudziesięciu Ω . To oznacza, że stosowanie nieliniowych układów ochronnych jest korzystniejsze od konwencjonalnych liniowych układów ochronnych, ponieważ w licznych przypadkach obecność takiego rezystora koliduje z przeznaczeniem kondensatora, na przykład kiedy kondensator jest wykorzystywany jako element filtra wygładzającego.

PODSUMOWANIE

W odróżnieniu od zasady dopasowania impedancji obciążenia do wewnętrznej impedancji aktywnego źródła energii elektrycznej, w celu uzyskania maksymalnej sprawności przekazywania energii, przy iskrowym rozładowaniu kondensatora maksymalna wartość energii elektrycznej pochłanianej w kanale wyładowania (tzn. w przestrzeni międzyelektrodowej) osiąga się, kiedy wartość rezystancji kanału wyładowania wielokrotnie przewyższa wewnętrzną rezystancję strat kondensatora.

Wydajność energetyczna procesu wyładowania, stanowiąca procentowy udział energii elektrycznej pochłanianej w kanale wyładowania w stosunku do pierwotnej energii zgromadzonej w kondensatorze, jest maksymalna na początku procesu wyładowania przy minimalnej szybkości zmian rezystancji kanału wyładowania, a także dla liniowego modelu zmiany rezystancji kanału wyładowania elektrycznego.

Rezystor szeregowo włączony w obwód rozładowania kondensatora staje się skuteczny, pod względem redukcji energii pochłanianej w kanale wyładowania, przy wartości powyżej dziesięciu omów, przy czym efekt redukcji nie jest stały dla kondensatorów o różnej pojemności. Stosowanie dodatkowego rezystora natomiast, szeregowo włączonego w obwód rozładowania kondensatora, w przypadku zastosowania nieliniowego układu ochronnego, zmniejsza w sposób wyraźny wartość energii oddawanej do kanału wyładowania elektrycznego. Istotne zmniejszenie tej energii osiąga się już dla wartości dodatkowego rezystora kilka omów. To oznacza, że zastosowanie nieliniowych układów ochronnych jest korzystniejsze niż konwencjonalnych liniowych układów ochronnych, ponieważ w licznych przypadkach obecność takiego rezystora o dużej wartości koliduje z przeznaczeniem kondensatora, na przykład kiedy kondensator jest wykorzystywany jako element filtra wygładzającego.

Znaczący efekt redukcji energii pochłanianej w kanale wyładowania osiąga się w przypadku stosowania nieliniowego układu elektronicznego, zwierającego punkt iskrowego rozładowania kondensatora z jak najkrótszym opóźnieniem w stosunku do rozpoczęcia procesu rozładowania. Potencjalna wartość tej redukcji nie przewyższa 50% w przypadku stosowania progowych układów zabezpieczenia nadprądowego.

Literatura

1. Grzywak A. (1969): *Obwody iskrobezpieczne w układach automatyki górniczej*. Praca Nauk.-Bad. Gliwice, ZKMPW.
2. IEC 60079-11 Ed. 5.0: *Electrical apparatus for explosive gas atmospheres*. Part 11: Intrinsic safety "i".
3. Kravtchenko V.S., Sierov V.I., Jerygin A.T., Pogorelski A.E. (1976): *Iskrobezopasnost eliektryczeskich ciepiej*. Moskwa, Izdatielstwo „Nauka”.
4. Osiowski J. (1981): *Zarys rachunku operatorowego*. Warszawa, Wydaw. Naukowo-Techniczne.

Recenzent: dr inż. Stanisław Trzcionka