

Witalij Skoropacki*

EKSPERYMENTALNA OCENA WŁAŚCIWOŚCI OCHRONNYCH BARIER ISKROBEZPIECZEŃSTWA Z NIELINIOWĄ CHARAKTERYSTYKĄ PRĄDOWO-NAPIĘCIOWĄ

Streszczenie

Stwierdzono, że stosowanie normatywnego iskiernika IEC do realizacji technicznej komutacji awaryjnej typu „zwarcie” lub „rozwarcie” w badaniach obwodów elektrycznych z wykorzystaniem barier iskrobezpieczeństwa z nieliniową charakterystyką prądowo-napięciową typu „z podcięciem” (*foldback*), staje się niemożliwe, ponieważ jego konstrukcja mechaniczna nie zapewnia prawidłowego funkcjonowania takich barier, dokonujących zwierania zacisków wejściowych obwodu chronionego. Innymi słowy, przy prędkości obrotowej elektrod wolframowych, 80 obr/min iskiernika i elektrody kadmowej, obracającej się wolniej w przeciwnym kierunku, mającej dwie równoległe szczeliny szerokości 2 mm w tarczy o średnicy 30 mm, uniemożliwia powrót bariery iskrobezpieczeństwa do stanu pierwotnego, po dokonaniu zwarcia biegunów zasilania. Problem ten szczególnie uwidacznia się podczas badania barier iskrobezpieczeństwa z wykorzystaniem wartości pochodnej prądu lub napięcia w algorytmie funkcjonowania.

Zaproponowano metodykę eksperymentalnej oceny właściwości ochronnych barier iskrobezpieczeństwa z nieliniową charakterystyką prądowo-napięciową oraz jej techniczną realizację. Podstawę metodyki stanowią pomiary oscyloskopowe z układem mechanicznym (iskiernikiem) do dokonywania komutacji awaryjnej typu „zwarcie” lub „rozwarcie” w badanym układzie elektrycznym bez zastosowania probierczej mieszaniny gazowo-powietrznej.

Opracowano konstrukcję mechaniczną iskiernika nadającego się do empirycznej estymacji wartości energii elektrycznej wydzielanej w punkcie komutacji awaryjnej przy stosowaniu barier iskrobezpieczeństwa z nieliniową charakterystyką prądowo-napięciową. Zbudowano stanowisko pomiarowe i przeprowadzono pomiary weryfikacyjne.

Przedstawiona metoda eksperymentalnej estymacji wartości energii elektrycznej, wyzwalanej w kanale wyładowania elektrycznego oraz jej realizacja sprzętowa, pozwalają na:

- przekonanie się a priori o iskrobezpieczeństwie projektowanego obwodu (układu) elektrycznego,
- dokonanie analizy poziomu iskrobezpieczeństwa obwodu elektrycznego w zależności od wartości elementów i układów tworzących ten obwód (układ),
- zmniejszenie, ogólnie rzecz biorąc, kosztów opracowania i wdrożenia aparatury elektrycznej przeznaczonej do pracy w strefach zagrożonych wybuchem,
- badanie iskrobezpieczeństwa obwodów elektrycznych ze zwiększonym, pod względem iskrobezpieczeństwa, natężeniem prądu.

Metodyka eksperymentalnej oceny nie wymaga stosowania probierczej mieszaniny gazowo-powietrznej, a więc może być stosowana w jednostkach gospodarczych zajmujących się projektowaniem i wytwarzaniem aparatury elektrycznej, przeznaczonej do pracy w strefach zagrożonych wybuchem, do wstępnej przedcertyfikacyjnej analizy zastosowanych rozwiązań technicznych.

Experimental evaluation of properties of spark safety protective barriers with nonlinear current-voltage characteristic

Abstract

It has been stated that the application of standard IEC spark gap for technical realisation of failure commutation of “shorting” or “open” type in testing electric circuits with making use of spark safety

* Główny Instytut Górnictwa.

barriers with nonlinear current-voltage characteristic of foldback type becomes impossible. It results from their mechanical construction which does not ensure the proper operation of such barriers which carry out short-circuiting protected circuit input terminals. In other words, at the rotational speed of 80 rot/min of the spark gap wolfram electrodes and the cadmium electrode which rotates slower in the opposite direction and has two parallel gaps of 2 mm wide in the disk of 30 mm in diameter disallowing the spark safety barrier to return to its primary condition after carrying out supply poles short-circuiting.

This problem is especially shown during testing spark safety barriers with making use of the current derivative value or voltage in operational algorithm.

Experimental methodology of evaluation of protective properties of spark safety barriers with non linear current-voltage characteristic and their technical realisation has been proposed. The basis of the methodology constitutes oscilloscope measurements with the mechanical system (spark gap) for carrying out failure commutation of "short circuit" or "open" type in the tested electrical system without the application of test gas and air mixture.

Mechanical construction of the spark gap has been elaborated. It is suitable to the empiric estimation of the electrical energy value which is emitted at the point of failure commutation at the application of spark safety barriers with nonlinear current- voltage characteristic.

A measuring position has been built and verification measurements have been carried out.

Presented methodology of experimental estimation of electrical energy value that releases in the channel of electrical discharge and its equipment realisation enables:

- to convince a priori of the spark safety of a designed electric system,
- to carry out the analysis of the spark safety level of an electric system depending on the value of elements and systems creating the circuit (system),
- to test spark safety of electric circuits,
- to decrease generally the cost of its elaboration and implementation of electric apparatus assigned for working in explosive conditions zones,
- to test the spark safety of electric circuits with increased, in terms of spark safety, current intensity.

The experimental methodology of estimation does not require the application of test gas and air mixture so it may be applied by economic units dealing with designing and manufacturing electric apparatus, assigned for working in explosive conditions zones, for the initial before-verification analysis of applied technical solutions.

WPROWADZENIE

W urządzeniach elektrycznych przeznaczonych do pracy w strefach zagrożonych wybuchem coraz częściej są stosowane bariery iskrobezpieczeństwa z nieliniową charakterystyką prądowo-napięciową (Skoropacki 2003; Skoropacki i in.). Bariery te umożliwiają wyprzedzającą separację energetyczną źródła zasilania w chwili powstania komutacji awaryjnej w obwodzie chronionym na podstawie:

- ciągłej kontroli parametrów obwodu elektrycznego i odłączenia źródła zasilania w przypadku, kiedy te parametry przekroczą wartości dopuszczalne,
- odłączenia źródła zasilania przy przekroczeniu dopuszczalnej wartości prądu lub napięcia,
- kontroli szybkości zmian prądu i napięcia w obwodzie elektrycznym.

Aplikowanych jest kilka podstawowych sposobów realizacji technicznej wyprzedzającej separacji energetycznej obwodu chronionego od źródła zasilania: pierwszy z nich polega na zwarciu biegunów wyjściowych źródła zasilania w chwili powstania komutacji awaryjnej w obwodzie chronionym, drugi na odłączeniu zasilania źródła od obwodu chronionego i trzeci sposób – kombinowany – polega na jednoczesnym zwarciu i odłączeniu.

Wykorzystanie takiego zabezpieczenia wymaga spełnienia wymagań zawartych w normie PN-EN 60079-11(U), a mianowicie ograniczenia wartości energii przepływającej przez barierę iskrobezpieczeństwa w stanie przejściowym. Według tej normy, w przypadku urządzeń kategorii „i_a”, zastosowanie sterowanych elementów półprzewodnikowych jako równoległych ograniczników napięcia, jest dozwolone przy wyeliminowaniu oddziaływania stanów przejściowych w zasilającej sieci energetycznej na wejściowe i wyjściowe obwody iskrobezpieczne. W przypadku stosowania tyrystorów jako zwerników zacisków wyjściowych źródła zasilania, energia z tego źródła, przepływająca przez układ ochronny do obciążenia w stanie przejściowym, nie powinna przekraczać wartości: 260 μ J – grupa I, 160 μ J – grupa IIA, 80 μ J – grupa IIB, 20 μ J – grupa IIC.

Zastosowanie normatywnego iskiernika (iskiernik IEC), zbudowanego zgodnie z wytycznymi zawartymi w normie PN-EN 60079-11(U), do realizacji technicznej komutacji awaryjnej typu „zwarcie” lub „rozwarcie” w badaniach obwodów elektrycznych z wykorzystaniem barier iskrobezpieczeństwa z nieliniową charakterystyką prądowo-napięciową typu „z podcięciem” (*foldback*), staje się niemożliwe, ponieważ jego konstrukcja mechaniczna nie zapewnia prawidłowego funkcjonowania barier, dokonujących zwarcia zacisków wejściowych obwodu chronionego. Innymi słowy, przy prędkości obrotowej elektrod wolframowych 80 obr/min iskiernika i elektrody kadmowej, obracającej się wolniej w przeciwnym kierunku, mającej dwie równoległe szczeliny szerokości 2 mm w tarczy o średnicy 30 mm, uniemożliwia powrót bariery iskrobezpieczeństwa do stanu wejściowego, po dokonaniu zwarcia biegunów zasilania. Problem ten jest szczególnie widoczny podczas badania barier iskrobezpieczeństwa przy wykorzystaniu wartości pochodnej prądu lub napięcia w algorytmie funkcjonowania.

W niniejszym artykule przedstawiono metodykę eksperymentalnej oceny właściwości ochronnych barier iskrobezpieczeństwa z nieliniową charakterystyką prądowo-napięciową oraz jej techniczną realizację. Podstawą tej metodyki są pomiary oscyloskopowe z zastosowaniem układu mechanicznego (iskiernika) do dokonywania komutacji awaryjnej typu „zwarcie” lub „rozwarcie” w badanym układzie elektrycznym bez probierczej mieszaniny gazowo-powietrznej.

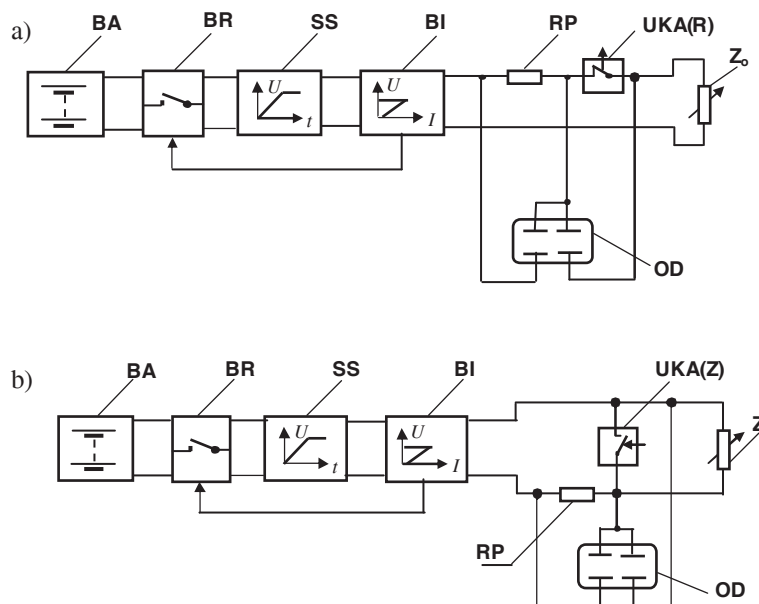
Należy również podkreślić, że badania iskrobezpieczeństwa obwodów i systemów elektrycznych z wykorzystaniem probierczej mieszaniny gazowo-powietrznej są pracochłonne i drogie. Jest to związane z koniecznością oceny iskrobezpieczeństwa obwodu lub systemu elektrycznego w różnorodnych stanach pracy, których może być kilkadziesiąt, a nawet kilkaset.

1. METODYKA EKSPERYMENTALNEJ OCENY WŁAŚCIWOŚCI OCHRONNYCH BARIER ISKROBEZPIECZEŃSTWA Z NIELINIOWĄ CHARAKTERYSTYKĄ PRĄDOWO-NAPIĘCIOWĄ

Jako kryterium zapłonu mieszaniny wybuchowej, przy komutacji awaryjnej w obwodzie elektrycznym, przyjęto wartość energii elektrycznej wyzwanej w procesie wyładowania elektrycznego. Wartość tej energii jest sumarycznym skutkiem oddziaływania poszczególnych elementów magazynujących energię elektryczną i źródeł zasilania.

Podstawę estymacji wartości energii elektrycznej przepływającej do obciążenia przez barierę iskrobezpieczeństwa z nieliniową charakterystyką prądowo-napięciową, dokonującą separacji energetycznej źródła zasilania przez zwarcie biegunów tego zasilacza w chwili powstania komutacji awaryjnej w obciążeniu, stanowią pomiary oscyloskopowe. W metodyce zastosowano dwukanałowy cyfrowy oscyloskop, przy czym jeden z kanałów był wykorzystywany do rejestracji chwilowych wartości napięcia w kanale wyładowania elektrycznego (na iskierniku), a drugi – do rejestracji chwilowych wartości prądu płynącego przez ten kanał. Metoda taka pozwala na wyznaczenie wartości energii elektrycznej w punkcie wyładowania elektrycznego, powstałym w dowolnym miejscu obwodu elektrycznego.

Na rysunku 1 przedstawiono schemat strukturalny stanowiska do estymacji energii przepływającej, w stanie przejściowym, od źródła zasilania przez barierę iskrobezpieczeństwa do obciążenia, przy komutacji awaryjnej typu „rozwarcie” (rys. 1a) i „zwarcie” (rys. 1b).



Rys. 1. Schemat strukturalny stanowiska do badań właściwości ochronnych nieliniowych barier iskrobezpieczeństwa z nieliniową charakterystyką prądowo-napięciową: a – komutacja typu „rozwarcie”, b – komutacja typu „zwarcie”; BA – bateria akumulatorów, BR – bezpiecznik resetowalny, SS – układ „soft-start”, BI – bariera iskrobezpieczeństwa, UKA – układ realizacji komutacji awaryjnej (R – „rozwarcie”, Z – „zwarcie”), RP – rezystor pomiarowy, Z_0 – obciążenie, OD – oscyloskop dwukanałowy

Fig. 1. Position structural diagram for testing protective properties of nonlinear spark safety barriers with nonlinear current-voltage characteristic: a – commutation of “open” type, b – commutation of “shorting” type; BA – accumulator battery, BR – reset fuse, SS – “soft-start” system, BI – spark safety barrier, UKA – system of failure commutation realisation (R – “open”, Z – “shorting”) measuring resistor, Z_0 – charge, OD – two-channel oscilloscope

Stanowisko to składa się z następujących podstawowych funkcjonalnych podzespołów: **BA** – baterii akumulatorów z niską rezystancją wewnętrzną, **BR** – resetowanego elektronicznego bezpiecznika, dokonującego rozwarcia obwodu wyjściowego

źródła zasilania w celu ochrony przed przeciążeniem elementów elektronicznych po zadziałaniu bariery iskrobezpieczeństwa oraz do eliminacji konieczności wymiany bezpiecznika topikowego, po dokonaniu poszczególnych pomiarów, **SS** – układu miękkiego startu, **BI** – badanej bariery iskrobezpieczeństwa z nieliniową charakterystyką prądowo-napięciową, **UKA(Z)** – układu dokonującego zwarcia między określonymi punktami obwodu elektrycznego (zmodyfikowanego iskiernika), **UKA(R)** – układu powodującego rozwarcie w określonym punkcie, **RP** – rezystora pomiarowego do określania natężenia prądu w kanale wyładowania elektrycznego (w badaniach zastosowano równoległe połączenie kilku rezystorów w celu uzyskania rezystancji $0,010 \Omega$), **Z_o** – obciążenia w postaci regulowanego rezystora lub różnych schematów połączeń elementów RLC i modeli torów przewodowych, **OD** – dwukanałowego oscyloskopu typu Tektronix TDS 5032B, zapewniającego możliwość tworzenia i obróbki przebiegów matematycznych. Podczas prowadzenia pomiarów przez oscyloskop mogą być wykonywane operacje matematyczne na danych pomiarowych:

- dodawanie, odejmowanie, mnożenie i dzielenie,
- przekształcanie funkcjonalne przebiegów: całkowanie, różniczkowanie itp.,
- analiza widmowa przebiegów,
- tworzenie histogramów, uśrednianie wszystkich punktów w oknie histogramu, obliczanie odchylenia standardowego wszystkich zebranych punktów w oknie histogramu itp.

Układy **UKA(Z)** i **UKA(R)** są odpowiednio przeznaczone do cyklicznego zwierania i rozwierania w sposób mechaniczny, w dowolnym miejscu obwodu elektrycznego.

Energia elektryczna W_w , wydzielona w punkcie wyładowania elektrycznego (na iskierniku), jest równa

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

gdzie:

- R_p – wartość rezystora pomiarowego (pożądana jest możliwie najmniejsza, wynikająca z czułości oscyloskopu),
- τ_w – czas trwania wyładowania,
- $u_1(t)$ – przebieg napięcia na iskierniku,
- $u_2(t)$ – przebieg napięcia na oporniku pomiarowym.

Przy rezystancyjnym obciążeniu bariery iskrobezpieczeństwa określa się szybkość jej zadziałania i wartość energii elektrycznej przepływającej ze źródła zasilania do kanału wyładowania elektrycznego. Z kolei przy obciążeniu reaktancyjnym metoda ta umożliwia określenie całkowitej wartości energii elektrycznej wyzwanej w punkcie wyładowania elektrycznego, wskutek konwersji w ciepło energii elektrycznej zgromadzonej w elementach reaktancyjnych obciążenia i energii elektrycznej przepływającej ze źródła zasilania. Pozwala na ustalenie poziomu iskrobezpieczeństwa przy powstawaniu komutacji awaryjnej w dowolnym miejscu badanego obwodu lub systemu elektrycznego.

Należy podkreślić, że zgodnie z normą PN-EN 60079-11(U), pomiar prądu przepływającego przez układ ochronny w stanie przejściowym powinien odbywać się za pomocą sondy prądowej. Jednak pomiary porównawcze wykazały, że wyniki oznaczania energii elektrycznej w kanale wyładowania z wykorzystaniem rezystora pomiarowego okazały się o 10% większe w stosunku do oznaczanych z wykorzystaniem czujnika prądowego.

2. KONSTRUKCJA ISKIERNIKA DO BADAŃ WŁAŚCIWOŚCI ZAPALAJĄCYCH WYŁADOWAŃ ELEKTRYCZNYCH

Iskiernik IEC jest przeznaczony do zainicjowania zapłonu odpowiedniej probierczej mieszaniny wybuchowej przez wytworzenie łuku elektrycznego przy przerywaniu lub zwieraniu obwodu elektrycznego. Równocześnie punkt wyładowania elektrycznego, tzw. punkt komutacji awaryjnej, powinien znajdować się w otoczeniu mieszaniny wybuchowej w celu rejestracji powstania zapłonu. Konstrukcja iskiernika IEC jest opisana w normie PN-EN 60079-11(U). Jedną z dwóch elektrod stanowi w nim obrotowa kadmowa tarcza stykowa z dwoma rowkami szerokości 2 mm. Drugą elektrodę stanowią cztery wolframowe druciki o średnicy 0,2 mm, umocowane na okręgu o średnicy 50 mm w uchwycie elektrod, który jest obracany z prędkością 80 obr/min tak, że wolframowe druciki ślizgają się po rowkowanej tarczy kadmowej. Średnica tarczy kadmowej wynosi 30 mm. Tarcza kadmowa obraca się w przeciwnym kierunku z prędkością około 20 obr/min.

Przy prędkości obrotowej uchwytu elektrod wolframowych 80 obr/min i tarczy kadmowej, obracającej się w przeciwnym kierunku z prędkością około 20 obr/min, liniowa szybkość zwarcia (rozwarcia) elektrod iskiernika IEC wynosi

$$V_k = \frac{2\pi(R_1 \cdot 80 + R_2 \cdot 20)}{60} = \frac{2\pi(0,025 \cdot 80) + (0,014 \cdot 20)}{60} = 0,23, \text{ m/s} \quad (2)$$

gdzie:

R_1 – promień zamocowania drucików wolframowych na uchwycie elektrod,

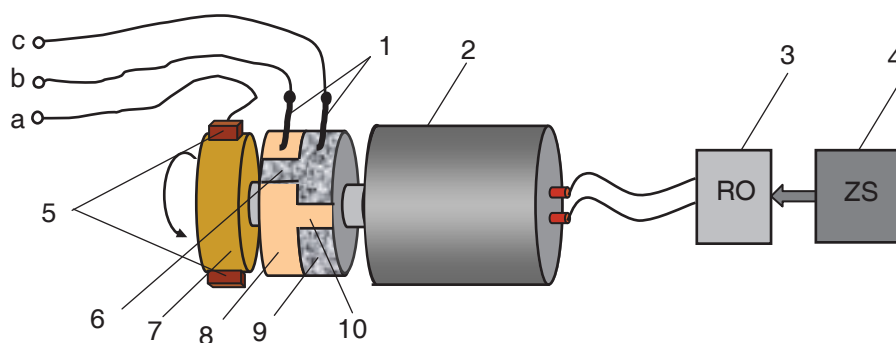
R_2 – promień tarczy kadmowej iskiernika w punkcie styku z drucikami wolframowymi.

Przy badaniu właściwości ochronnych barier iskrobezpieczeństwa z nieliniową charakterystyką prądowo-napięciową, na przykład typu *foldback*, w trybie awaryjnego zwarcia, okres, podczas którego elektrody komutacyjne znajdują się w stanie rozwarcia, wynosi około $8,7 \cdot 10^{-3}$ s. Po tym czasie, po dokonaniu separacji energetycznej punktu wyładowania elektrycznego przez zwarcie biegunów zasilania, bariera iskrobezpieczeństwa nie jest w stanie wrócić do stanu początkowego, zwłaszcza kiedy w algorytmie działania bariery jest wykorzystywane kryterium wartości pochodnej prądu obciążenia. Ten typ barier iskrobezpieczeństwa wymaga na wejściu układu miękkiego startu, co z kolei ogranicza możliwość stosowania typowego iskiernika IEC do badań właściwości ochronnych barier iskrobezpieczeństwa z nieliniową charakterystyką prądowo-napięciową. Iskiernik IEC, w zasadzie, jest progowym indykatozem do eksperymentalnego uzyskiwania odpowiedzi, czy badany układ elektryczny z li-

niową barierą iskrobezpieczeństwa, najczęściej z tzw. barierą Zenera, może być zakwalifikowany do właściwej kategorii iskrobezpiecznej.

Z przyczyn tych została opracowana konstrukcja mechaniczna iskiernika, dalej zwanego układem komutacji awaryjnej (UKA), nadającym się do empirycznej estymacji wartości energii elektrycznej wydzielanej w punkcie komutacji awaryjnej przy stosowaniu barier iskrobezpieczeństwa z nieliniową charakterystyką prądowo-napięciową. Zasada mechanicznej budowy takiego układu została przedstawiona na rysunku 2.

Przy opracowaniu koncepcji budowy mechanicznej układu komutacji awaryjnej typu „zwarcie” i „rozwarcie” do badań pomiarowych obwodów elektrycznych z wykorzystaniem barier iskrobezpieczeństwa z nieliniową charakterystyką prądowo-napięciową założono, pod względem szybkości rozwarcia (zwarcia) elektrod w punkcie komutacji awaryjnej, najbardziej niekorzystne warunki zapłonu, tzn. sprzyjające wyzwoleniu maksymalnej wartości energii elektrycznej w punkcie wyładowania.



Rys. 2. Zasada budowy mechanicznej iskiernika dokonującego komutacji awaryjnej typu „zwarcie” i „rozwarcie”: a, b, c – zaciski, 1 – drucik wolframowy, 2 – silnik elektryczny, 3 – regulator obrotów, 4 – zasilacz sieciowy, 5 – węglowe płytki kontaktowe (szczotki stykowe), 6 – segment kadmowy, 7 – tarcza brązowa, 8 – segment durakrylowy, 9 – tarcza kadmowa, 10 – segment durakrylowy

Fig. 2. The principle of spark gap mechanical building carrying out failure commutation of “open” and “shorting” type: a, b, c – terminals, 1 – wolfram wire, 2 – electric engine, 3 – speed governor, 4 – power pack, 5 – coal contact plate (contact brushes), 6 – cadmium segment, 7 – bronze disk, 8 – duracrylate segment, 9 – cadmium disk, 10 – duracrylate segment

Tarcze 7 i 9 iskiernika są połączone elektrycznie. Podczas obracania tarczy 9 z segmentem durakrylowym 8, występuje iskrzenie między drucikiem wolframowym 1 i segmentem kadmowym 6, realizując przy tym komutację awaryjną typu „zwarcie” między zaciskami a i b. Z kolei realizacja techniczna komutacji awaryjnej typu „rozwarcie” jest dokonywana między zaciskami a i c przez przerywanie styku drucika wolframowego 1 z tarczą kadmową 9 przez segment durakrylowy 10.

Rezystancja ruchomego styku między tarczą 7 a węglowymi szczotkami stykowymi 5 powinna być mniejsza od $5,0 \text{ m}\Omega$. Zapewnia się to przez polerowanie tarczy brązowej oraz za pomocą dopasowania powierzchni stykowych między węglowymi szczotkami stykowymi 5 a tarczą brązową 7.

W celu zapewnienia przepływu prądu większego niż 2 A zastosowano drucik wolframowy 1 o średnicy 0,4 mm i długości 10 mm. Całkowita rezystancja układu wynosiła około 8,5 mΩ, a całkowita indukcyjność < 1 μH.

W celu uzyskania szybkości zwarcia i rozwarcia kontaktów elektrod z szybkością działania iskiernika IEC średnicę d tarczy kadmowej 9 określono jako

$$d \approx \frac{0,27 \cdot 60}{\pi n} \quad (3)$$

gdzie n oznacza liczbę obrotów tarczy.

Z kolei przy realizacji komutacji awaryjnej typu „zwarcie” długość segmentu durakrylowego powinna zapewnić możliwość powrotu badanej bariery iskrobezpieczeństwa do stanu wejściowego podczas styku drucika wolframowego z tym segmentem. Analogicznie, przy realizacji komutacji awaryjnej typu „rozwarcie”, długość segmentu kadmowej tarczy 9 powinna również zapewnić powrót bariery iskrobezpieczeństwa do stanu wejściowego. Okres powrotu bariery iskrobezpieczeństwa do stanu wejściowego jest determinowany szybkością ustalenia wartości znamionowej napięcia na wyjściu układu „soft-start”, która z kolei nie może przekroczyć progowej wartości pochodnej napięcia, w celu wyeliminowania powtórnego zadziałania badanej bariery iskrobezpieczeństwa.

Przy liniowej szybkości zwarcia V_k drucika wolframowego 1 z segmentem kadmowym 6 niezbędną długość segmentu durakrylowego l_d określa się jako

$$l_d = \tau_{ss} V_k \quad (5)$$

gdzie τ_{ss} oznacza czas ustanowienia się napięcia na wyjściu układu „soft-start”.

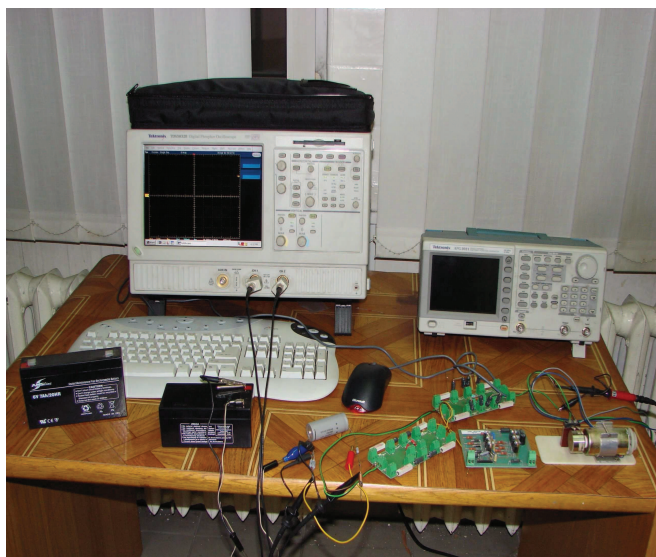
W praktyce τ_{ss} wynosi około 100 ms. Dla $V_k = 0,27$ m/s jest korzystne, aby długość segmentu durakrylowego była większa niż 27 mm, a średnica tarczy kadmowej 9 większa niż 25 mm.

Regulacja szybkości rozwarcia (zwarcia) elektrod odbywa się przez sterowanie szybkością obrotową silnika elektrycznego.

3. WYNIKI EKSPERYMENTU

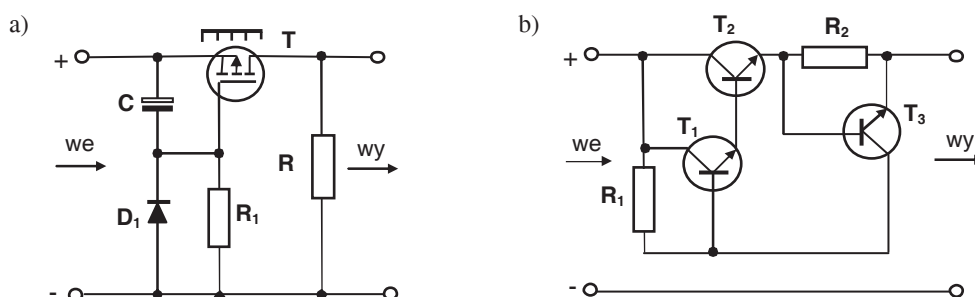
Model laboratoryjny stanowiska pomiarowego został wykonany z zastosowaniem kadmowej tarczy komutacyjnej o średnicy 30 mm (fot. 1). Tarcza jest napędzana za pomocą silnika stałoprądowego na napięcie znamionowe 24 VDC, zasilanego z regulowanego laboratoryjnego zasilacza prądu stałego.

W celu uzyskania miękkiego narastania napięcia na wejściu bariery iskrobezpieczeństwa zastosowano analogowy układ „soft-start” (rys. 3a), a dla eliminacji konieczności wymiany bezpiecznika topikowego, po dokonaniu poszczególnych komutacji awaryjnych, zastosowano samoresetowany bezpiecznik elektroniczny przedstawiony na rysunku 3.



Fot. 1. Stanowisko pomiarowe do eksperymentalnej estymacji wartości energii elektrycznej

Phot. 1. Measuring position for experimental estimation of electrical energy value



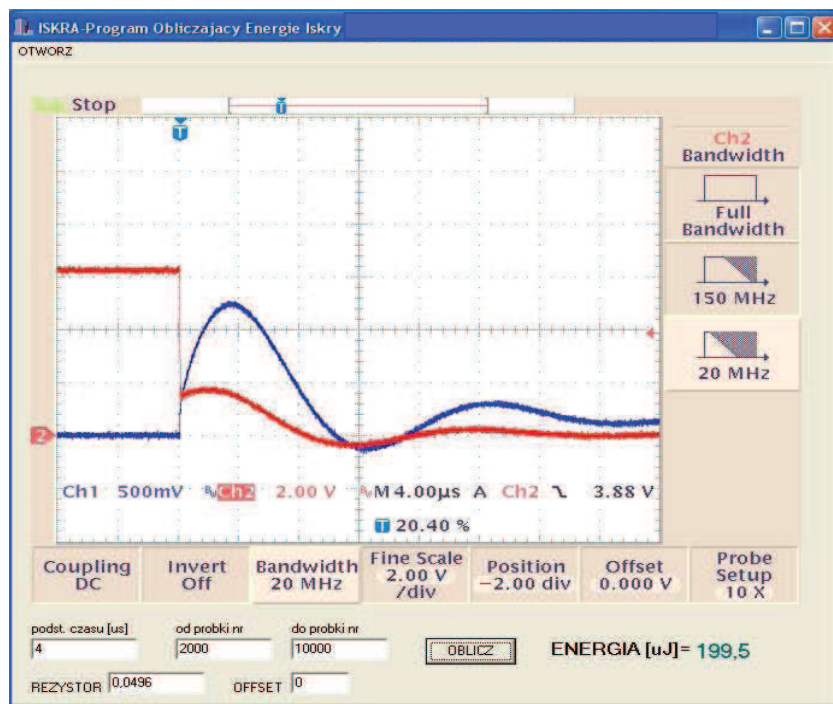
Rys. 3. Schematy ideowe analogowego układu miękkiego startu (a) i samoresetowanego bezpiecznika elektronicznego (b)

Fig. 3. Schematic diagram of soft start analog system (a) and self-reset electrical fuse (b)

Prąd zadziałania bezpiecznika ustawia się za pomocą rezystorów R_1 i R_2 . W zakresie zmian rezystora R_1 od 100 do 4700 Ω i rezystora R_2 od 0,12 do 4,7 Ω prąd zadziałania bezpiecznika można zmieniać od 5 do 0,1 A.

Jako źródła energii elektrycznej z małą rezystancją wewnętrzną zastosowano akumulatory kwasowo-ołowiowe. Przy stosowaniu akumulatorów ołowiowych jako źródeł energii elektrycznej z małą rezystancją wewnętrzną ($< 5 \text{ m}\Omega$), nie jest możliwe uzyskanie w stanie naładowania napięć wyjściowych o standardowych wartościach znamionowych. Z tej przyczyny pomiary eksperymentalne zostały przeprowadzone dla wartości napięć wyjściowych naładowanych baterii akumulatorów: 6,1 VDC; 12,6 VDC; 14,7 VDC; 25,2 VDC; 50,4 VDC.

Poniżej (rys. 4) przykładowo przedstawiono oscylogramy przebiegów czasowych chwilowych wartości prądów, napięć i mocy oraz wyniki obliczeń energii w punkcie wyładowania elektrycznego.

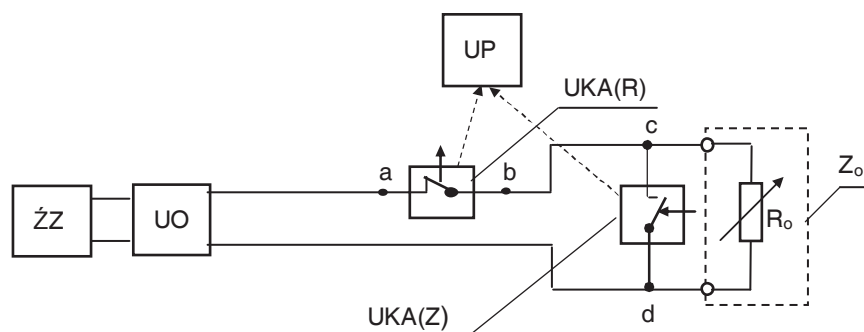


Rys. 4. Oscylogramy przebiegów czasowych chwilowych wartości prądu i napięcia na iskierniku przy zwarcu zacisków wejściowych układu ochronnego obciążonego kondensatorem o pojemności $14 \mu\text{F}$

Fig. 4. Oscillograms of time courses of instantaneous current and voltage values at the spark gap at input terminals shorting of the protective system charged with a condenser of $14 \mu\text{F}$ capacity

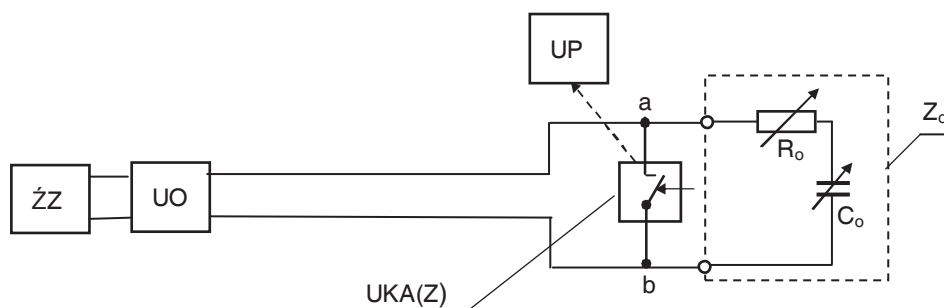
Estymacji energii elektrycznej dokonano dla różnych wartości prądu w obciążeniu. Uprozczone schematy blokowe układów do pomiaru energii w kanale wyładowania elektrycznego dla różnego charakteru obciążenia przedstawiono na rysunkach 5–7.

Połączenie układu pomiarowego z punktem komutacji awaryjnej na tych rysunkach ma wyłącznie symboliczny charakter, w rzeczywistości układ pomiarowy w postaci dwukanałowego oscyloskopu podłącza się do badanego obwodu elektrycznego według schematów pomiarowych, przedstawionych rysunkach 1 i 2. Wyniki pomiarów energii elektrycznej, wyzwalanej w kanale wyładowania, zawierają tablice 1–3. W wartościach rezystancyjnego obciążenia R_o , przedstawionych w tablicy 3, uwzględniono wartości rezystancyjne indukcyjnych cewek. Wartości podane na szarym tle są mniejsze od progowej wartości energii zapłonu mieszaniny metanowo-powietrznej (Gordon, West, Widginton 1962; Frączek 1995).



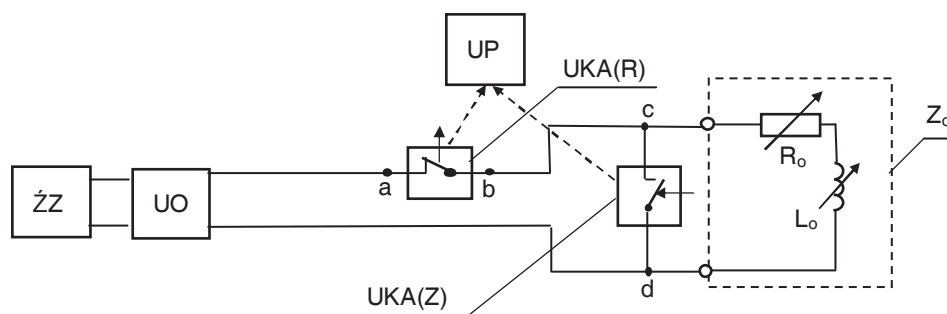
Rys. 5. Uproszczony schemat blokowy układu do pomiaru energii w kanale wyładowania elektrycznego dla rezystancyjnego obciążenia (rozwarćcie punktów a i b , zwarcie punktów c i d): $\dot{Z}\dot{Z}$ – źródło zasilania, UO – układ ochronny, UP – układ pomiarowy, $UKA(Z)$ – układ realizacji komutacji awaryjnej typu „zwarcie”, $UKA(R)$ – układ realizacji komutacji awaryjnej typu „rozwarćcie”, R_o – rezystor nastawny

Fig. 5. Simplified system block diagram for measuring energy in the channel of electrical discharge for resistant charge (opening points a and b , shorting points c and d): $\dot{Z}\dot{Z}$ – source of power, UO – protective system, UP – measuring system, $UKA(Z)$ – failure commutation realisation system of “shorting” type, $UKA(R)$ – failure commutation realisation system of “open” type, R_o – variable resistor



Rys. 6. Uproszczony schemat blokowy układu do pomiaru energii w kanale wyładowania elektrycznego dla obciążenia w postaci szeregowego połączenia RC (zwarcie punktów a i b): $\dot{Z}\dot{Z}$ – źródło zasilania, UO – układ ochronny, UP – układ pomiarowy, $UKA(Z)$ – układ realizacji komutacji awaryjnej typu „zwarcie”, R_o – rezystor nastawny, C_o – dekada pojemności

Fig. 6. Simplified system block diagram for measuring energy in the channel of electrical discharge for charge in the form of connected in series RC (shorting points a and b): $\dot{Z}\dot{Z}$ – source of power, UO – protective system, UP – measuring system, $UKA(Z)$ – failure commutation realisation system of “shorting” type, R_o – variable resistor, C_o – capacity decade



Rys. 7. Uproszczony schemat blokowy układu do pomiaru energii w kanale wyładowania elektrycznego dla obciążenia w postaci szeregowego połączenia RL (rozwarcie punktów a i b, zwarcie punktów c i d): ŻŻ – źródło zasilania, UO – układ ochronny, UP – układ pomiarowy, UKA(Z) – układ realizacji komutacji awaryjnej typu „zwarcie”, UKA(R) – układ realizacji komutacji awaryjnej typu „rozwarcie”, L_0 – dekada indukcyjności, R_0 – rezystor nastawny

Fig. 7. Simplified system block diagram for measuring energy in the channel of electrical discharge for charge in the form of connected in series RL (opening points a and b shorting points c and d): ŻŻ – source of power, UO – protective system, UP – measuring system, UKA(Z) – failure commutation realisation system of “shorting” type, UKA(R) – failure commutation realisation system of “open” type, L_0 – inductance decade, R_0 – variable resistor

Tablica 1. Uśrednione wartości energii elektrycznej W_k pochłanianej w kanale wyładowania elektrycznego dla rezystancyjnego obciążenia (rozwarcie punktów a i b, zwarcie punktów c i d, rys. 5)

Napięcie na wejściu układu ochronnego U_{wy} , V	6,1	12,6	14,7	25,2	50,4
Znamionowy prąd obciążenia, przy którym następuje zadziałanie układu ochronnego I_{zw} , A (ustawiane)	2,5	1,5	1,0	0,7	0,3
Prąd w obciążeniu w chwili komutacji awaryjnej I_{wy} , A	2,45	1,45	0,95	0,65	0,25
Wartość energii w kanale wyładowania elektrycznego W_k , μJ					
zwarcie	10,4	17,9	22,0	26,2	44,8
rozwarcie	8,4	12,7	14,9	18,4	31,6

Tablica 2. Uśrednione wartości energii elektrycznej W_k pochłanianej w kanale wyładowania elektrycznego dla obciążenia w postaci szeregowego połączenia RC (zwarcie punktów a i b, rys. 6)

Napięcie na wejściu układu ochronnego U_{wy} , V				6,1	12,6	14,7	25,2	50,4
Znamionowy prąd obciążenia (zwarcia), przy którym następuje zadziałanie układu ochronnego I_{zw} , A (ustawiany)				2,5	1,5	1,0	0,7	0,3
Prąd w obciążeniu w chwili komutacji awaryjnej I_{wy} , A				0	0	0	0	0
Wartość energii w kanale wyładowania elektrycznego W_k , μJ	$R_o = 0 \Omega$	C_o , μF	0,1	12,2	14,1	22,1	24,8	30,1
			1,0	23,4	53,8	61,4	112,8	222,3
			10,0	72,7	221,4	341,3	543,2	1841,2
			100	435,8	2420,6	3919,2	8860,6	35180,6
			500	813,7	5702,9	7330,3	15140,6	66690,9
	$R_o = 1 \Omega$	C_o , μF	0,1	12,1	13,9	21,9	22,7	29,8
			1,0	22,4	43,5	57,2	92,3	212,2
			10,0	62,7	271,4	230,1	313,1	1831,8
			100	333,4	2110,2	3515,3	7110,2	35080,2
			500	713,7	4901,5	72201	13040,8	66390,1
	$R_o = 10 \Omega$	C_o , μF	0,1	12,1	11,2	18,1	17,7	27,1
			1,0	22,4	45,2	55,3	52,3	112,2
			10,0	62,7	124,3	164,8	213,1	581,7
			100	183,4	634,1	678,9	2110,2	17080,2
			500	213,7	2152,4	2352,3	8040,4	45260,1

	$R_o = 40 \Omega$	$C_o, \mu F$	0,1	10,6	3,2	4,6	17,7	27,1
			1,0	12,2	15,5	18,4	42,3	102,2
			10,0	17,8	22,9	31,3	154,7	421,7
			100	57,5	83,4	103,4	1110,2	11080,2
			500	85,7	235,2	315,2	440,4	25260,1

Tabela 3. Uśrednione wartości energii elektrycznej W_k pochłanianej w kanale wyładowania elektrycznego dla obciążenia w postaci szeregowego połączenia RL (rozwarcie punktów a i b, rys. 7)

Napięcie na wejściu układu ochronnego U_{wy}, V				5,4	13,5	16,2	24,3	48,6
Znamionowy prąd obciążenia (zwarcia), przy którym następuje zadziałanie układu ochronnego I_{zw}, A (ustawiany)				2,5	1,5	1,0	0,7	0,3
Prąd w obciążeniu w chwili dokonania komutacji awaryjnej I_{wy}, A				1,7	1,45	0,95	0,65	0,25
Wartość energii w kanale wyładowania elektrycznego $W_k, \mu J$	$R_o = 1,5 \Omega$	L_o, mH	0,01	26,2	–	–	–	–
			0,5	481,1	–	–	–	–
			1,0	1362,2	–	–	–	–
			20,0	30020,0	–	–	–	–
			100,0	145192,0	–	–	–	–
	$R_o = 9,3 \Omega$	L_o, mH	0,01	–	18,3	–	–	–
			0,5	–	217,1	–	–	–
			1,0	–	495,8	–	–	–
			20,0	–	10978,8	–	–	–
			100,0	–	48600,4	–	–	–
	$R_o = 17,0 \Omega$	L_o, mH	0,01	–	–	16,2	–	–
			0,5	–	–	18,5	–	–
			1,0	–	–	167,5	–	–
			20,0	–	–	4956,2	–	–
			100,0	–	–	24458,1	–	–
	$R_o = 37,5 \Omega$	L_o, mH	0,01	–	–	–	15,6	–
			0,5	–	–	–	17,9	–
			1,0	–	–	–	65,8	–
			20,0	–	–	–	2143,0	–
			100,0	–	–	–	11564,2	–
	$R_o = 195,0 \Omega$	L_o, mH	0,01	–	–	–	–	13,1
			0,5	–	–	–	–	16,9
			1,0	–	–	–	–	33,1
			20,0	–	–	–	–	405,1
			100,0	–	–	–	–	2159,3

PODSUMOWANIE

Iskiernik IEC jest w zasadzie progowym indykatorem służącym do eksperymentalnego uzyskania odpowiedzi, czy badany układ elektroniczny może być zakwalifikowany do odpowiedniej kategorii iskrobezpiecznej pod względem energii wydzielanej w punkcie komutacji awaryjnej, powstałym w dowolnym miejscu badanego układu. Iskiernik ten w postaci przedstawionej w normie PN-EN 60079-11(U) nie nadaje się do badań właściwości ochronnych barier iskrobezpieczeństwa z nieliniową charakterystyką prądowo-napięciową, na przykład *foldback*, zwłaszcza barier iskro-

bezpieczeństwa z wykorzystaniem wartości pochodnej prądu lub napięcia w algorytmie funkcjonowania.

Przedstawiona metoda eksperymentalnej estymacji wartości energii elektrycznej wyzwalanej w kanale wyładowania elektrycznego oraz jej realizacja sprzętowa pozwala na:

- przekonanie się a priori o iskrobezpieczeństwie projektowanego obwodu (układu) elektrycznego,
- dokonanie analizy poziomu iskrobezpieczeństwa obwodu elektrycznego w zależności od wartości elementów i układów tworzących ten obwód (układ),
- zmniejszenie, ogólnie rzecz biorąc, kosztów opracowania i wdrożenia aparatury elektrycznej przeznaczonej do pracy w strefach zagrożonych wybuchem,
- badanie iskrobezpieczeństwa obwodów elektrycznych ze zwiększonym, pod względem iskrobezpieczeństwa, natężeniem prądu.

Przy rezystancyjnym obciążeniu bariery iskrobezpieczeństwa określa się szybkość zadziałania bariery i wartość energii elektrycznej przepływającej ze źródła zasilania do kanału wyładowania elektrycznego. Z kolei przy obciążeniu reaktancyjnym metoda umożliwia określenie całkowitej wartości energii elektrycznej, wyzwalanej w kanale wyładowania elektrycznego, z uwzględnieniem energii elektrycznej zgromadzonej w elementach reaktancyjnych obciążenia i energii elektrycznej przepływającej ze źródła zasilania, co z kolei pozwala na określenie poziomu iskrobezpieczeństwa przy powstawaniu komutacji awaryjnej w dowolnym miejscu badanego obwodu lub systemu elektrycznego.

Metodyka eksperymentalnej oceny nie wymaga stosowania probierczej mieszaniny gazowo-powietrznej, a więc może być wykorzystywana w jednostkach gospodarczych zajmujących się projektowaniem i wytwarzaniem aparatury elektrycznej, przeznaczonej do pracy w strefach zagrożonych wybuchem do wstępnej przedcertyfikacyjnej analizy zastosowanych rozwiązań technicznych.

Literatura

1. Gordon R., West L., Widginton D. (1962): The ignition of methane – air mixtures by arc discharges of controlled duration. Institution of Electrical Engineers Conference Reptor Series. London.
2. Frączek J. (1995): Aparatura przeciwybuchowa w wykonaniu iskrobezpiecznym. Katowice, Śląskie Wydaw. Techniczne.
3. PN-EN 60079-11(U). Electrical apparatus for explosive gas atmospheres. Part 11: Intrinsic safety “i”.
4. Skoropacki W. (2003): Parametry ochronne układów zabezpieczenia przeciwiskrzeniowego z nieliniową charakterystyką wyjściową. Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko nr 4.
5. Skoropacki W. i in.: Układ zabezpieczenia przeciwiskrzeniowego obwodu zdalnego zasilania. Patent RP nr 155781.
6. Skoropacki W. i in.: Bariera ochronna iskrobezpiecznego obwodu elektrycznego. Patent RP nr 180574.

Recenzent: dr inż. Stanisław Trzcionka