

Aparatura pomiarowa do diagnostyki upływności elektroenergetycznych kabli i przewodów oponowych stosowanych w kopalnianych sieciach SN

Measuring equipment for diagnosing the leakage of electrical cables and tire wires used in mine MV networks

Streszczenie. Aparatura pomiarowa w wykonaniu iskrobezpiecznym, do diagnostyki upływności kabli przeznaczona jest do zabezpieczeń upływowych blokujących w sieciach SN z izolowanym punktem neutralnym oraz do współpracy z generatorem probierczym dla przeprowadzania prób napięciowych. Aparatura we współpracy z odpowiednio przystosowanym sterownikiem polowym, tworzy zespół zabezpieczający do ochrony linii kablowych. Urządzenie w wykonaniu iskrobezpiecznym zostało zaprojektowane zgodnie z dyrektywą ATEX. Projekt urządzenia zawiera odpowiednio dobrane grubości i szerokości ścieżek obwodów drukowanych, rezystory ograniczające prąd wejściowy w układach pomiaru rezystancji, a także bariery diodowe jako ograniczniki napięcia.

Abstract Intrinsically safe measuring equipment for cable leakage diagnostics is intended for blocking leakage protection in MV networks with an insulated neutral point and for cooperation with a test generator for carrying out voltage tests. The equipment, in cooperation with an appropriately adapted field controller, creates a safety unit to protect cable lines. The intrinsically safe device has been designed in accordance with the ATEX directive. The device design includes appropriately selected thicknesses and widths of printed circuit paths, resistors limiting the input current in resistance measurement systems, as well as diode barriers as voltage limiters.

Słowa kluczowe: ATEX, upływność kabli, urządzenia pomiarowe, sieć średniego napięcia

Keywords: ATEX, cable leakage, measuring equipment, MV network

Wstęp

Górnictwo węgla zmagają się z zagrożeniem wybuchu metanu i pyłu węglowego, co prowadzi do katastrof. Stan techniczny elektroenergetycznych kabli oraz przewodów oponowych ma istotne znaczenie tak dla bezpieczeństwa ich eksploatacji, jak i dla niezawodności dostawy energii elektrycznej do maszyn oraz urządzeń górniczych. Dlatego ważne jest skonstruowanie iskrobezpiecznej aparatury pomiarowo – sterowniczej dla oceny stanu technicznego kabli elektroenergetycznych przed podaniem na nie napięcia.

Wymagania bezpieczeństwa zawarte są w prawodawstwie UE – dyrektywa ATEX, normach zharmonizowanych [1, 2] z dyrektywą i przepisach krajowych (ustawa, dopuszczenia Wyższego Urzędu Górniczego WUG i normach górniczych). Określone przepisy regulują wymagania do konstrukcji aparatury pomiarowo-zabezpieczającej w przestrzeniach zagrożonych wybuchem.

Iskrobezpieczna aparatura pomiarowa do diagnostyki upływności kabli przeznaczona jest do zabezpieczeń upływowych blokujących w sieciach SN z izolowanym punktem neutralnym oraz do współpracy z generatorem probierczym dla przeprowadzania prób napięciowych. Aparatura przystosowana do współpracy z odpowiednio przystosowanym sterownikiem polowym, tworzy zespół zabezpieczający do ochrony linii kablowych, zwłaszcza w sieciach elektroenergetycznych o napięciu znamionowym powyżej 1 kV, zasilających maszyny przodkowe w kopalni.

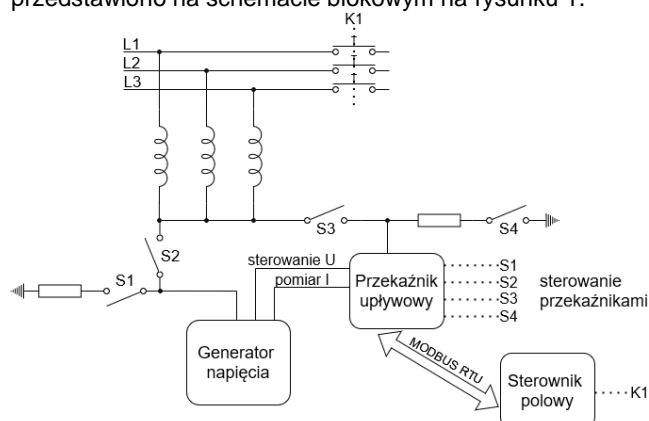
Systemy zabezpieczeń w sieciach elektroenergetycznych

Stosowany obecnie w sieciach SN system zabezpieczeń nadprądowych oraz ziemnozwarciowych jest niewystarczający do wykrycia zwarć upływowych o wartości rezystancji upływowej rzędu wielu kiloomów. Dla sieci kopalnianej o napięciu znamionowym $3,3 < U_n \leq 6$ kV rezystancja nastawcza zabezpieczenia blokującego wynosi 360 kΩ [3, 5]. Odpowiednią detekcją zwarć wysokoomowych zapewniają zabezpieczenia upływowe stosowane powszechnie w sieciach niskiego napięcia. Zabezpieczenia te pozwalają na wykrycie niewłaściwych stanów roboczych i

reagują na występujące stany zakłócenia z odpowiednią szybkością, czułością i niezawodnością. Zastosowanie odpowiednich algorytmów zabezpieczeń pozwala na wykrycie i wyeliminowanie zagrożenia wybuchem metanu i pyłu węglowego.

Idea działania i algorytmy zabezpieczeń

Badanie jakości kabla elektroenergetycznego przeprowadza się w dwóch etapach. W etapie pierwszym wymusza się przepływ małego prądu podłączonego do punktu neutralnego sztucznej gwiazdy utworzonej z trzech dławików, które drugimi końcami podłączone są do szyn L1, L2, L3 linii odpyływowej w sieci SN. Ideę działania przedstawiono na schemacie blokowym na rysunku 1.



Rys. 1. Badanie jakości kabla energetycznego

Wartość prądu dobiera się tak, aby energia pola magnetycznego zgromadzona w dławikach nie spowodowała zagrożenia wybuchem. Minimalna energia zapłonu dla I grupy urządzeń wynosi 525 μJ [2, 4]. W drugim etapie na żyły wewnętrzne kabla podawane jest napięcie probiercze o ograniczonym i monitorowanym prądzie wyjściowym, dla upewnienia się, czy upływność nie uaktywni się pod napięciem. Badania te odbywają się przed doprowadzeniem napięcia roboczego na kabel. Po podaniu

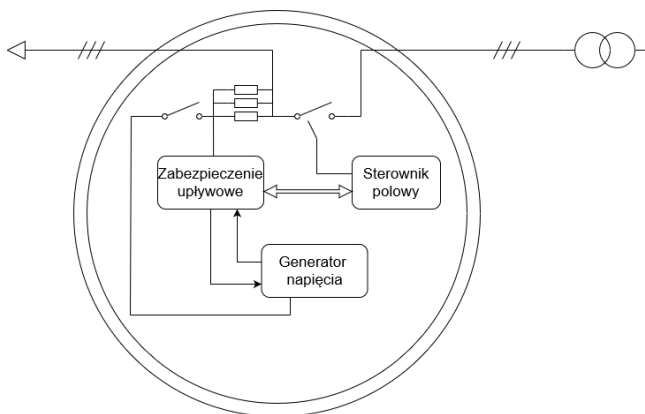
napięcia na kabel korzysta się z typowych zabezpieczeń nadprądowych oraz ziemnozwarciowych.

Opis układu

Przedstawiana w artykule aparatura pomiarowa składa się z trzech niezależnych urządzeń zamkniętych w obudowie ognioszczelnej. Są to:

- sterownik polowy,
- zabezpieczenie upływowe,
- generator probierczy.

Całość pracy rozdzielnicy nadzoruje sterownik polowy. Koncepcja rozwiązania technicznego została przedstawiona na rysunku 2.

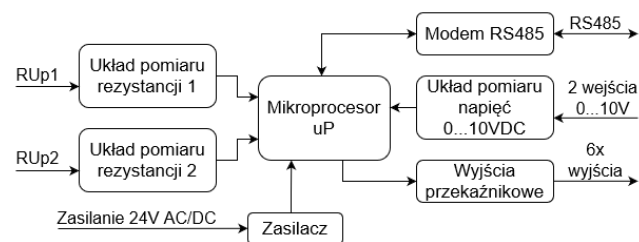


Rys. 2. Koncepcja rozwiązania technicznego zabezpieczenia blokującego

Urządzenie „Zabezpieczenie upływowe” (grupy I, kategorii M1) przeznaczone jest do zabezpieczeń upływowych blokujących w sieciach WN z izolowanym punktem neutralnym oraz do współpracy z generatorem probierczym dla przeprowadzania prób napięciowych. Zespół przystosowany jest do współpracy z odpowiednio przygotowanym sterownikiem polowym. Zabezpieczenie upływowe umieszczone jest w obudowie ognioszczelnej. Urządzenie zawiera obwody w wykonaniu iskrobezpiecznym o poziomie zabezpieczenia: „ia” (bardzo wysoki stopień bezpieczeństwa). Ochrona przed wybuchem jest zastosowana poprzez konstrukcję obwodów, w tym ograniczenie energii w obwodzie iskrobezpiecznym do wartości niepowodującej zapłonu atmosfery wybuchowej.

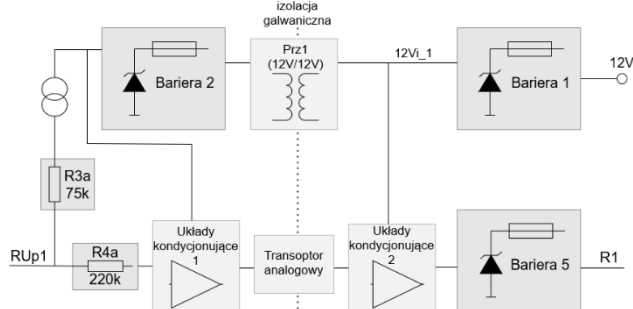
Urządzenie integruje w sobie funkcje, jak przedstawione na schemacie blokowym na rysunku 3:

- pomiarów prądów upływowych (2 kanały pomiarowe),
- sterowania próbą napięciową z generatora WN,
- pomiaru prądu i napięcia wyjściowego z generatora,
- współpracy ze sterownikiem polowym poprzez łącze RS485 w protokole MODBUS,
- samokontroli łącza komunikacyjnego.



Rys. 3. Schemat blokowy zabezpieczenia upływowego

Pracą urządzenia „Zabezpieczenie upływowe” steruje mikroprocesor. Jego zadaniem jest realizacja pomiarów wartości analogowych oraz sterowanie wyjściami przekaźnikowymi. Wartości pomiarowe przesyłane są do sterownika zarządzającego za pośrednictwem modemu RS485, ze sterownika przychodzą polecenia wysterowania poszczególnych wyjść przekaźnikowych. Modem RS485 umożliwia transmisję danych pomiędzy urządzeniem „Zabezpieczenie upływowe” a sterownikiem zarządzającym. Modem RS485 składa się z przetwornicy i układu zapewniającego pracę w standardzie RS485 z izolacją galwaniczną na poziomie 2,5 kVAC (60s). Układ zasilania składa się z przetwornicy o napięciu wejściowym 24V AC lub DC i wyjściowym 12V, zapewniającej izolację galwaniczną na poziomie 3 kVDC (60s), regulatora impulsowego 5 V i stabilizatora liniowego 3,3V. Z napięcia 12 V zasilane są przekaźniki, przetwornice iskrobezpieczne i regulator impulsowy 5V, który z kolei zasilają przetwornice zasilające modem RS485 i układ pomiaru napięć 0..10 V.



Rys. 4. Schemat blokowy układu pomiaru rezystancji

W układzie pomiaru rezystancji upływowej, przedstawionej na rysunku 4, wykorzystano transoptory analogowe zapewniające izolację stałą wewnątrz struktury na poziomie 1 mm. Prąd pomiarowy (16.5 μ A) generowany przez źródła prądowe jest doprowadzony z węzła RUUp1 do mierzonych rezystancji upływowych powstałych w kablu, a następnie mierzone są na nich wartości napięcia, które poprzez układy kondycjonujące, transoptory i bariery doprowadzone są do wejść przetwornicy analogowo cyfrowego mikroprocesora (sygnał R1). Zasilanie nieiskrobezpiecznych części obwodu iskrobezpiecznego zapewniają przetwornice. Napięcie wyjściowe przetwornic jest ograniczone barierą diodową 2, zaś napięcie wejściowe, jakie może pojawić się na przetwornicach w wykonaniu iskrobezpiecznym, układach kondycjonujących i transoptorach ograniczone jest barierami 1 i 5. Rezystory R3a i R4a ograniczają maksymalny prąd obwodów iskrobezpiecznych.

Iskrobezpieczeństwo

Aby konstrukcję urządzeń uznać za iskrobezpieczną, należy spełnić wiele wymagań wynikających z dyrektywy ATEX i norm z nią zharmonizowanych [1, 2]. Wymagania te dotyczą zarówno konstrukcji, jak i użycia odpowiednich elementów i materiałów. Urządzenia do stref zagrożenia wybuchem dzielimy na:

- urządzenia w wykonaniu iskrobezpiecznym przeznaczone do pracy w strefie zagrożenia wybuchem,
- urządzenia towarzyszące, które pozostają poza strefą zagrożenia wybuchem, lecz pewne obwody wchodzą do strefy zagrożonej wybuchem.

Przy projektowaniu urządzeń iskrobezpiecznych należy zwrócić uwagę na grubość i szerokość ścieżek płytek drukowanych. Ścieżki łączące elementy barier ochronnych w

urządzeniu zabezpieczenie upływu zaprojektowano zgodnie z punktem 8.7 normy PN-EN 60079-11:2007 [2], a więc:

- mają szerokość 80 mil (2.032 mm), czyli ≥ 2 mm,
- grubość warstwy miedzi wynosi 36 μm , czyli ≥ 33 μm .

Zatem można je uznać za połączenia nieuszkodzalne, niepowodujące przerwy w obwodzie. Prawdopodobieństwo takich uszkodzeń, podczas działania lub składowania, uważa się za tak małe, że nie bierze się go pod uwagę.

Maksymalne napięcie, które może wystąpić w iskrobezpiecznym obwodzie pomiaru rezystancji to $U_o = 14,3$ VDC. Napięcie to wynika z zastosowanej bariery 2 widocznej na rysunku 4. W obwodzie pomiaru rezystancji zastosowano dwa rezystory ograniczające prąd wyjściowy z obwodu iskrobezpiecznego. Rezystory ograniczające prąd to rezystory warstwowe R_{3a} i R_{4a} , lutowane w powierzchniowo (obudowa 1206). Warunki pracy rezystorów ograniczających prąd zostały zaprojektowane z uwzględnieniem ich budowy i rozpraszanej mocy. Standardowo rezystory warstwowe SMD w obudowie o rozmiarze 1206 mają możliwość rozproszenia mocy 0,125W w temperaturze 70°C. Powyżej tej temperatury występuje obniżenie wartości znamionowych mocy, która wg standardowej krzywej począwszy od 70°C spada do zera dla temperatury 125°C. Oznacza to, że w maksymalnej temperaturze, jaka będzie panowała wewnątrz obudowy (przy maksymalnym obciążeniu urządzenia zabezpieczenia upływowego), tj. 80°C warstwowy rezystor SMD w obudowie 1206 będzie zdolny rozprószyć moc, po uwzględnieniu temperaturowych współczynników korekcyjnych dla obwodów drukowanych, co najmniej 100 mW [1]. Uwzględniając maksymalną możliwą do rozproszenia moc przez rezystor ograniczający prąd (współczynnik 1,5), moc ta wynosić będzie co najmniej 66 mW dla rezystora warstwowego SMD w obudowie 1206. Biorąc pod uwagę najbardziej niekorzystną sytuację niezliczanych uszkodzeń w obwodzie, rezystory R_{3a} i R_{4a} mogą być dołączone do najwyższego napięcia panującego w obwodzie tj do napięcia U_o .

• Ponieważ $U_o = 14,3$ V, natomiast rezystancja rezystora $R_{3a} = 75$ k Ω , to $I_{1a} = 191$ μA

• Ponieważ $U_o = 14,3$ V, natomiast rezystancja rezystora $R_{4a} = 270$ k Ω , to $I_{2a} = 53$ μA

W najbardziej niekorzystnej sytuacji niezliczanych uszkodzeń w obwodzie rezystory R_{3a} i R_{4a} są połączone równolegle i dołączone do wyjścia układu z jednej strony, a z drugiej do napięcia U_o obwodu. Rezystory te ograniczą prąd do maksymalnej wartości (1):

$$(1) I_o = I_{1a} || I_{2a} = I_{1a} + I_{2a} \leq 0,25 \text{ mA}$$

Moc wydzielająca się na rezystorach R_{3a} i R_{4a} , to odpowiednio (2, 3):

$$(2) P_{3a} = U_o^2 / R_{3a} = (14,3 \text{ V})^2 / (75 \text{ k}\Omega) = 2,73 \text{ mW} \leq 66 \text{ mW}$$

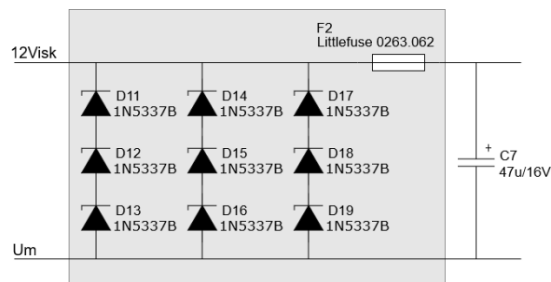
$$(3) P_{4a} = U_o^2 / R_{4a} = (14,3 \text{ V})^2 / (270 \text{ k}\Omega) = 0,76 \text{ mW} \leq 66 \text{ mW}$$

Wynika z tego, że rezystory ograniczające prąd spełniają swoje zadania nawet w dużo wyższej temperaturze pracy niż założone 80°C. Rezystory R_{3a} i R_{4a} spowodują ograniczenie prądu I_o do 0,25 mA.

Przykład obliczeń

Schemat ideowy równoległego ogranicznika napięcia dla wykonania iskrobezpiecznego „ia” przedstawiono na rysunku 5. Jako ogranicznik napięcia zastosowano barierę diodową

zbudowaną z 6 diod Zenera typu 1N5337B o napięciu $U_z = 4,7 \text{ V} \pm 5\%$ (4,465 V; 4,935 V) dla $I_z = 260$ mA, $I_f = 1$ A przy $U_f = 1,2$ V. Prąd płynący przez diodę 1N5342B ograniczony jest bezpiecznikiem o prądzie $I_n = 62$ mA/250 VAC o parametrach przedstawionych w tabeli 1. W urządzeniu użyto w równoległym ograniczniku napięcia bezpiecznika Littlefuse 0263.062 o wartości nominalnej $I_n = 62$ mA dla temperatury otoczenia 25 °C [6].

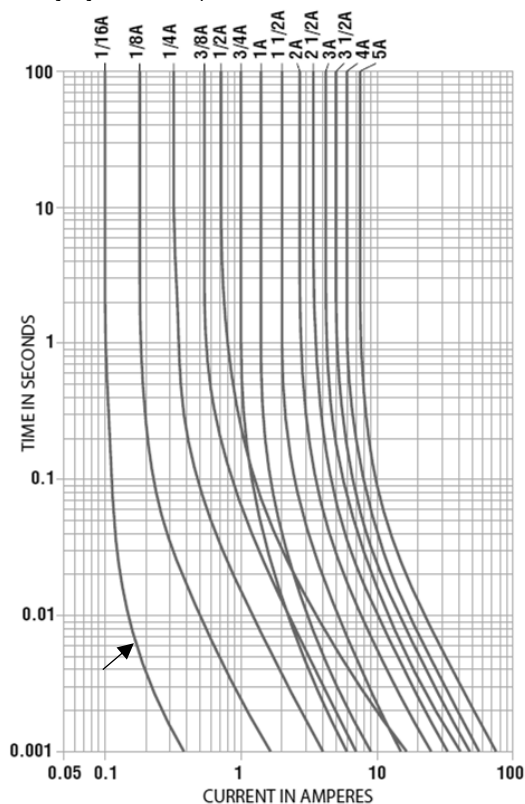


Rys. 5. Schemat ideowy równoległego ogranicznika napięcia dla wykonania iskrobezpiecznego „ia”

Tabela 1. Parametry bezpiecznika Littlefuse 0263.062 [6]

Prąd znamionowy [A]	0.062
Oznaczenie kodowe	.062
Maksymalne napięcie znamionowe [V]	250
Ocena przerwy izolacyjnej	50A@250VAC PSE: 100A@ 125VAC
Nominalna odporność na zimno [Ω]	5.50
Nominalne topienie I^2t [$\text{A}^2 \text{sec}$]	0.000192
Nominalny spadek napięcia [mV]	0.74

Zgodnie z normą PN-EN 60079-11:2012 [2] i nowym standardem IEC 60079-11: 2023 (edycja 7) [4] prąd I_n płynący przez bezpiecznik do obliczeń powinien być pomnożony x1,7. Szczegółowe charakterystyki zależności czasu przepalenia bezpiecznika w zależności od przepływającego prądu przedstawiono na rysunku 6 (charakterystyka 1/16 A).



Rys. 6. Charakterystyki zależności czasu przepalenia bezpiecznika w zależności od przepływającego prądu [6]

Biorąc pod uwagę podwójne uszkodzenie zliczane, w najgorszym przypadku dwie gałęzie (6 diod) będą odłączone od układu. W takim wypadku, aktywne pozostaną 3 diody, na każdą z nich przypadać będzie prąd (4):

$$(4) I_{n1,7} = 1,7 \times I_n = 1,7 \times 62 \text{ mA} = 105,4 \text{ mA}$$

Wartość tego prądu stanowi najgorsze warunki pracy dla diody, wobec tego maksymalna moc strat, jaka wydzieli się na diodzie wyniesie (5):

$$(5) P_{n1,7} = 4,935 \text{ V} \times 0,1054 \text{ A} < 0,5202 \text{ W}$$

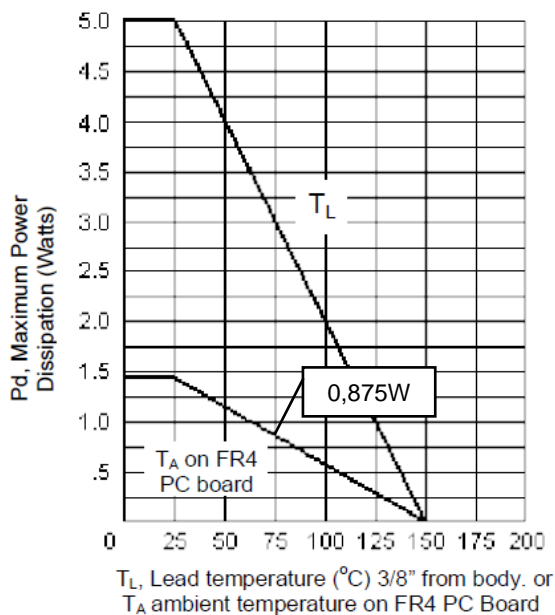
Postępując zgodnie z punktem 7.1 normy PN-EN 60079-11:2012 i nowym standardem IEC 60079-11: 2023 (edycja 7) [2, 4] wymaga się aby element był eksploatowany przy wartościach nie większych niż dwie trzecie maksymalnego prądu i mocy (6):

$$(6) P_{n1,7,1,5} = 1,5 \times 0,5202 < 0,7803 \text{ W}$$

Aby określić dopuszczalną moc strat diody Zenera 1N5337B, należy uwzględnić sposób montażu elementu oraz maksymalną temperaturę we wnętrzu obudowy. Dla maksymalnej temperatury pracy $T_{pmax} = 55^\circ\text{C}$ maksymalny przyrost temperatury otoczenia diody, podczas pracy urządzenia, nie przekracza 20°C . Zatem $T_a = 75^\circ\text{C}$. Nie jest też przekroczona maksymalna moc.

Na podstawie danych katalogowych [7] dla diod zamontowanych na płytce FR4, przedstawionych na rysunku 7, przyjęto następujące parametry:

- rezystancja termiczna złącze – otoczenie $R_{thja} \leq 85^\circ\text{C/W}$,
- maksymalna temperatura złącza $T_{jmax} \leq 150^\circ\text{C}$.



Rys. 7. Charakterystyka mocy diody 1N5337B [7]

Według charakterystyki mocy diody 1N5337B (umieszczonej na płytce drukowanej FR4, długość wyprowadzeń 3/8") od temperatury otoczenia, dla

temperatury otoczenia diody $T_a = 75^\circ\text{C}$ na diodzie nie może być przekroczona maksymalna moc $P_{max75^\circ\text{C}} = 0,875 \text{ W}$, zatem (7):

$$(7) P_{n1,7,1,5} = 0,7803 \text{ W} < P_{max75^\circ\text{C}} = 0,875 \text{ W}$$

W najgorszych warunkach pracy przy maksymalnej mocy strat $P = 0,7803 \text{ W}$ przyrost temperatury na złączu diody wyniesie (8):

$$(8) \Delta T P_{n1,7,1,5} \times R_{thja} = 0,7803 \text{ W} \times 85^\circ\text{C/W} = 66,33^\circ\text{C} \approx 67^\circ\text{C}$$

Uwzględniając maksymalną temperaturę otoczenia we wnętrzu obudowy $T_a = 75^\circ\text{C}$, temperatura złącza wyniesie (9):

$$(9) T_j = 67^\circ\text{C} + 75^\circ\text{C} = 142^\circ\text{C} < T_{jmax} = 150^\circ\text{C}$$

wobec tego nie została przekroczona maksymalna temperatura złącza. Dioda 1N5337B spełnia wymagania pkt. 7.5.2 normy PN-EN 60079-11:20012 [2].

Zgodnie z obliczeniami diody Zenera pracują poniżej 2/3 mocy znamionowej, więc ich uszkodzenia zaliczane są do uszkodzeń zliczanych. Dla poziomu zabezpieczenia „ia” mogą wystąpić dwa uszkodzenia tego typu. Każda z barier ochronnych zbudowana jest z trzech równoległych gałęzi diod. W przypadku uszkodzenia którejkolwiek z nich na zwarcie nastąpi przepalenie bezpiecznika, a w przypadku uszkodzenia dwóch diod na rozwarciu (np. w dwóch gałęziach – najgorszy przypadek) pełną funkcję zabezpieczającą bariery zapewni trzecia gałąź.

Podsumowanie

Iskrobezpieczna aparatura pomiarowa do diagnostyki upływności kabli przeznaczona jest do zabezpieczeń upływowych blokujących w sieciach SN z izolowanym punktem neutralnym oraz do współpracy z generatorem probierczym dla przeprowadzania prób napięciowych. Aparatura przystosowana do współpracy z odpowiednio przystosowanym sterownikiem polowym, tworzy zespół zabezpieczający do ochrony linii kablowych. Urządzenie zostało zaprojektowane zgodnie z wymaganiami dyrektywy ATEX. Dobrano odpowiednią parametry ścieżek obwodów drukowanych, zastosowano rezystory ograniczające prąd wejściowy w układach pomiaru rezystancji, a także zastosowano bariery diodowe jako ograniczniki napięcia.

Autorzy: mgr. inż. Piotr Sitek, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Tele- i Radiotechniczny, ul. Ratuszowa 11, 03-450 Warszawa, E-mail: piotr.sitek@itr.lukasiewicz.gov.pl;
mgr. inż. Jerzy Chudorliński, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Tele- i Radiotechniczny, ul. Ratuszowa 11, 03-450 Warszawa, E-mail: jerzy.chudorlinski@itr.lukasiewicz.gov.pl;
mgr. inż. Piotr Prystupik, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Tele- i Radiotechniczny, ul. Ratuszowa 11, 03-450 Warszawa, E-mail: piotr.prystupik@itr.lukasiewicz.gov.pl;
mgr. inż. Mariusz Kucharek, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Tele- i Radiotechniczny, ul. Ratuszowa 11, 03-450 Warszawa, E-mail: mariusz.kucharek@itr.lukasiewicz.gov.pl;

LITERATURA

- [1] PN-EN IEC 60079-0:2018-09. Atmosfery wybuchowe -- Część 0: Urządzenia -- Podstawowe wymagania
- [2] PN-EN 60079-11:2012. Atmosfery wybuchowe -- Część 11: Zabezpieczenie urządzeń za pomocą iskrobezpieczeństwa "i"
- [3] PN-G-42070:2001. Elektroenergetyka kopalniana -- Sieci elektroenergetyczne o napięciu znamionowym powyżej 1 kV zasilające maszyny prądowe – Wymagania
- [4] IEC 60079-11:2023 - Explosive atmospheres - Part 11: Equipment protection by intrinsic safety "i"
- [5] Boron W., Rezystancja izolacji górniczych kabli i przewodów oponowych Mechanizacja i Automatykacja Górnictwa 6,1998
- [6] Dokumentacja techniczna. Littelfuse 263 Series. Lipiec 2011
- [7] Dokumentacja techniczna. Microsemi 1N5333B thru 1N5388B. 2012