

## Zagadnienia termiczne przy konstrukcji urządzeń iskrobezpiecznych w ujęciu norm i dyrektyw.

**Streszczenie.** Artykuł przedstawia formalne aspekty dotyczące projektowania urządzeń, których budowa przeciwwybuchowa osiągana jest poprzez iskrobezpieczeństwo. Szczegółowo zostały rozważone zagadnienia związane z temperaturą elementów i powierzchni. Przedstawione zostały stawiane w tym zakresie wymagania oraz środki i sposoby ich spełnienia przewidziane przez normy i dyrektywy.

**Abstract.** The article presents formal aspects of designing intrinsically safe explosion-proof apparatus, with main focus on requirements towards temperatures of elements and surfaces. Formal requirements as stated by normative documents, as well as means of fulfilling them and possible pitfalls, are addressed. **Formal aspects of designing intrinsically safe explosion-proof apparatus**

**Słowa kluczowe:** obwody iskrobezpieczne, ATEX, iskrobezpieczeństwo, zagadnienia termiczne w projektowaniu, rezystancja termiczna, temperatura.

**Keywords:** intrinsically safe applications, ATEX, intrinsic safety, thermal design, temperature, thermal resistance.

### Wstęp

Urządzenia iskrobezpieczne są to urządzenia posiadające odpowiednio zabezpieczone obwody elektryczne, które są niezdolne do spowodowania wybuchu w otaczającej atmosferze wybuchowej.

Elektroniczne urządzenia iskrobezpieczne zasadniczo podlegają dyrektywie ATEX (nowej dyrektywie ATEX 2014/34/UE [1], która zastąpiła dyrektywę nr 94/9/WE (ATEX) [2] od dnia 20 kwietnia 2016 r.), ewentualnie również innym dyrektywom w zależności od przeznaczenia i konstrukcji. Najczęściej jest to nowa dyrektywa EMC 2014/30/UE [3]), która zastąpiła dyrektywę nr 2004/108/WE (EMC) [4] od dnia 20 kwietnia 2016 r., albo dyrektywa RTTE w przypadku urządzeń radiowych.

Sporadycznie mylnie powoływana jest dodatkowo również niskonapięciowa dyrektywa nr 73/23/EWG (LVD – Low Voltage Directive) [5], z której zakresu są wyłączone urządzenia elektryczne stosowane w atmosferze zagrożonej wybuchem [6]. Dyrektywom LVD i ATEX równocześnie podlegają natomiast urządzenia towarzyszące, instalowane poza strefą zagrożoną wybuchem. Urządzenia towarzyszące posiadają obwody iskrobezpieczne połączone z obwodami urządzeń iskrobezpiecznych znajdujących się w strefie zagrożonej wybuchem. Wówczas dopiero stosuje się dla tego urządzenia obie dyrektywy.

Podstawowe wymagania formalne i techniczne konstrukcji urządzeń elektrycznych przeznaczonych do stosowania w atmosferach zagrożonych wybuchem określa norma PN-EN 60079-0 [7]. W normie tej jest zawarta klasyfikacja, podział urządzeń na grupy, ogólne wymagania dotyczące wszystkich urządzeń elektrycznych, klasyfikacja temperaturowa, wymagania dotyczące obudowy, osprzętu, sposoby badania typu i wyrobu oraz znakowania. Urządzenia przeznaczone do stosowania w atmosferach zagrożonych wybuchem dzieli się na grupy:

- grupa I, przeznaczone do użytku w kopalniach, w których występuje zagrożenie wybuchem gazu kopalnianego i/lub pyłu węglowego,
- grupa II, do użytku w miejscach występowania gazowych atmosfer wybuchowych innych niż kopalnie, w których występuje zagrożenie wybuchem gazu kopalnianego,
- grupa III, do użytku w miejscach występowania pyłowych atmosfer wybuchowych innych niż kopalnie.

W normie PN-EN 60079-0 przewidziane są różne sposoby zapewnienia budowy przeciwwybuchowej. Jednym z

rodzajów budowy przeciwwybuchowej jest iskrobezpieczeństwo.

Wymagania szczegółowe dla urządzeń iskrobezpiecznych oraz urządzeń towarzyszących są zawarte w jedenastej części wspomnianej serii norm: PN-EN 60079-11 [8]. Bezpieczeństwo przeciwwybuchowe konstrukcji urządzeń elektronicznych powinno być zapewnione w wersji iskrobezpiecznej poprzez ograniczenie zdolności zapłonu inicjowanego iskrami oraz nagrzewaniem się, co jest realizowane jest poprzez zastosowanie następujących środków:

- zasilanie z iskrobezpiecznego źródła zasilania;
- brak przewyższających normatywnie dla źródła zasilania indukcyjności i pojemności w układzie (brak możliwości wystąpienia wyższych niż normatywnie energie zapłonu);
- ograniczenie temperatur powierzchni elementów do wartości dopuszczalnych, nie stwarzających ryzyka zapłonu;

### Aspekty temperaturowe urządzeń iskrobezpiecznych

W urządzeniach iskrobezpiecznych konstrukcja przeciwwybuchowa jest realizowana poprzez ograniczenie energii zapłonu i temperatury nagrzewania się elementów. Odpowiednie wartości i wymagania są określone w normach PN-EN 60079-0 [7] i PN-EN 60079-11 [8].

Klasyfikacji temperaturowej nie należy stosować do urządzeń towarzyszących. Jeżeli urządzenie towarzyszące jest umieszczone w atmosferze zagrożonej wybuchem, to powinno być zabezpieczone odpowiednim zabezpieczeniem przeciwwybuchowym rodzaju wymienionego w PN-EN 60079-0 i wtedy wymagania dotyczące tego rodzaju zabezpieczenia wraz z odpowiednią częścią PN-EN 60079 mają zastosowanie także do urządzenia towarzyszącego [8]. Ponieważ urządzenie towarzyszące jest w całości zabezpieczone odpowiednim zabezpieczeniem przeciwwybuchowym nie występuje w jego przypadku potrzeba przeprowadzania analizy i badań temperatur powierzchni.

Dla urządzeń grupy I

- maksymalna temperatura na dowolnej powierzchni, na której może się osadzać się warstwa pyłu węglowego nie powinna przekraczać 150 °C;

- oraz nie powinna przekraczać 450 °C tam, gdzie osadzenie pyłu węglowego jest wykluczone (poprzez ograniczenie możliwości osiadania / tworzenia warstwy pyłu zapewnione przez uszczelnienie lub przewietrzanie).

Dla urządzeń grupy II maksymalna temperatura powierzchni nie powinna być wyższa niż:

- temperatura przypisana klasie temperaturowej, do której dane urządzenie jest zakwalifikowane lub
- maksymalna temperatura powierzchni wyznaczona metodą badawczą opisaną w normie lub;
- temperaturze wynikającej z temperatury zapłonu konkretnego gazu, do którego urządzenie jest przeznaczone.

Dla nowej grupy III opisane w powyższych normach z 2012 roku wymagane jest tylko jedno: maksymalna wyznaczona temperatura powierzchni nie powinna być wyższa niż podana maksymalna dopuszczalna temperatura powierzchni [7].

W przypadku zdefiniowanych w normie tzw. „małych elementów”, przy spełnieniu określonych warunków dopuszczalne jest przekroczenie maksymalnych temperatur wynikających z klasy temperaturowej. Jedną z możliwości jest przeprowadzenie badań według punktu 26.5.3 normy [7] albo przeprowadzenie oceny i wykazanie, że stosowne limity temperatur powierzchni albo mocy dostarczonej do elementów, powiązane z powierzchniami tych elementów nie zostaną przekroczone. Ograniczenia te, uzależnione od grupy urządzenia i klasy temperaturowej oraz powierzchni elementu zamieszczono w tabeli 1.

W zależności od temperatury otoczenia i powierzchni elementu określana jest maksymalna moc, jaka może się w nich wydzielić lub maksymalna temperatura ich powierzchni. Podział elementów ze względu na ograniczenie mocy albo temperatury bez stosowania dodatkowych środków jak hermetyzacja określony jest tabelach 1 i 2.

Tabela 1. Ocena w celu klasyfikacji temperaturowej Powierzchnia elementu  $\geq 20 \text{ mm}^2$  Zmiana maksymalnej mocy rozpraszanej w zależności od temperatury otoczenia

Maksymalna temperatura otoczenia [°C]	Urządzenie grupy	40	50	60	70	80
Maksymalna moc rozpraszania [W]	grupa II	1,3	1,25	1,2	1,1	1,0
	grupa I	3,3	3,22	3,15	3,07	3,0

Ponadto dla elementu o powierzchni większej od  $20 \text{ mm}^2$  maksymalna moc, jaka może być w nim wydzielona uzależniona jest od temperatury otoczenia. Dopuszczalne moce w zależności od temperatury otoczenia dla poszczególnych grup urządzeń zamieszczono w tabeli 2.

Tabela 2. Ocena w celu klasyfikacji temperaturowej uwzględniająca wymiary elementu w temperaturze otoczenia  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Całkowite pole powierzchni z pominięciem przewodów połączeniowych	Urządzenie grupy II klasy temperaturowej T4		Urządzenie grupy I Pył wykluczony	
	Maksymalna temperatura powierzchni	Maksymalna moc rozpraszania	Maksymalna temperatura powierzchni	Maksymalna moc rozpraszania
	°C	W	°C	W
$< 20 \text{ mm}^2$	275	-----	950	-----
$\geq 20 \text{ mm}^2 \leq 1000 \text{ mm}^2$	200, lub	1,3	-----	3,3
$> 1000 \text{ mm}^2$	-----	1,3	-----	3,3

W przypadku wielu współczesnych urządzeń elektronicznych przeważającą większość a niejednokrotnie nawet wszystkie elementy, np. rezystory, tranzystory i układy scalone można zakwalifikować jako „elementy małe” w rozumieniu normy. Możliwość ta stanowi znaczące ułatwienie przy projektowaniu i przeprowadzaniu oceny zgodności z normą. W praktyce należy ograniczyć doprowadzaną w najbardziej niekorzystnym przypadku dla każdego elementu moc odpowiednio do limitu, jeżeli dotyczy on bezpośrednio mocy. Jeżeli limit dotyczy temperatury, wówczas również należy ograniczyć moc tak, aby przy uwzględnieniu rezystancji termicznej elementu w warunkach jego zamontowania i temperatury otoczenia, temperatura powierzchni tego elementu nie była przekroczona. Karty katalogowe licznych elementów dla których w typowych dla nich aplikacjach dane termiczne i dotyczące mocy nie są istotne, często nie zawierają niezbędnych do analizy parametrów, w szczególności rezystancji termicznych w warunkach, w jakich mają one być zamontowane.

Stopień złożoności współcześnie projektowanych urządzeń wynikający z ich funkcjonalności i zastosowań w znacznym stopniu sprawia, że projektowanie ich z uwzględnieniem wymagań iskrobezpieczeństwa stanowi duży problem. Przy uwzględnieniu najbardziej niekorzystnych przypadków uszkodzeń zliczanych i niezliczanych (odpowiednio uszkodzeń elementów odpowiadających i nie odpowiadających wymaganiom normy [8]) prowadzi do konieczności analizy obwodów o skomplikowanej topologii. Niejednokrotnie jest przyjmowany bardziej niekorzystny przypadek, niż mógłby mieć miejsce w rzeczywistości, ale pozwalający na

uproszczenie analizy, co jednak nie zawsze jest wskazane i możliwe – na przykład gdy elementy mają niewielką rezerwę mocy, a założenie upraszczające wprowadziłoby zbyt dużą różnicę. Ponadto przy urządzeniach o skomplikowanej topologii (pod względem analizy iskrobezpieczeństwa) nie zawsze kombinacja uszkodzeń prowadząca do najbardziej niekorzystnego przypadku jest oczywista, co implikuje przeprowadzanie analizy dla większej liczby kombinacji różnych uszkodzeń. Dodatkowo, znaczne utrudnienie wynika często z dużej liczby elementów nieliniowych o różnych charakterystykach, przykładowo diod Zenera (w układach ograniczników napięcia) o różnych napięciach i ich tolerancjach.

Wiele urządzeń charakteryzuje się topologią, w której do dużej liczby małych elementów będzie doprowadzona jednakowa moc. Wystarczy wówczas wykazać spełnienie wymagań dla elementów stanowiących najbardziej niekorzystne przypadki, co znacznie upraszcza analizę.

Częstym rozwiązaniem jest dzielenie urządzenia na obwody iskrobezpieczne, w których moc jest ograniczona stosownie do wymagań. Obwody te zależnie od potrzeb oddzielane mogą być ogranicznikami napięcia, prądu i mocy w różnych konfiguracjach (przy zastosowaniu diod Zenera, rezystorów, bezpieczników) lub też pełną separacją galwaniczną. Środki przewidziane w normie [8] pozwalające ograniczyć moc, jaka może być przeniesiona pomiędzy obwodami dają duże możliwości doboru stosownie do potrzeb, a ponadto mogą być stosowane łącznie. Oddzielanie obwodów wynikające z potrzeby ograniczenia mocy wydzielanych w poszczególnych obwodach często jest korzystne również z innych względów związanych z zapewnieniem iskrobezpieczeństwa, np. ograniczenie

napięć ze względu na pojemności i prądów ze względu na indukcyjności, nieraz te same środki mogą spełniać obydwie funkcje.

Zastosowanie bezpiecznika zgodnego z punktem 7.3 normy [8] pozwala ograniczyć ciągły prąd, skutkując przy danym napięciu ograniczeniem mocy. Dopuszczalne jest również uwzględnienie rezystancji na zimno bezpiecznika jako ograniczającej wartość chwilową prądu.

Zastosowanie szeregowego rezystora pozwala ograniczyć prąd i moc przy danym napięciu. Ograniczniki napięcia (np. w postaci diod Zenera) w połączeniu z szeregowymi rezystorami i/lub bezpiecznikiem zgodnie z punktem 7.5.2 normy [8] zapewniają ograniczenie napięcia, prądu i mocy.

Zgodnie z punktem 7.5.3 normy [8] w celu jednokierunkowego ograniczenia prądu możliwe jest zastosowanie szeregowych blokujących diod. Ograniczenie mocy tylko do składowej zmiennej jest możliwe do uzyskania przez zastosowanie zespołu dwóch kondensatorów blokujących zgodnych z punktem 8.6.1 normy [8].

Zastosowanie pełnej separacji galwanicznej (punkt 8.9 normy [8]) pozwala na całkowite wyeliminowanie możliwości przeniesienia mocy pomiędzy obwodami (w tym przypadku dotyczy to np. separacji sygnału lub transmisji, a nie o separację zasilania która z kolei ma na celu przeniesienie mocy z maksymalną sprawnością). Zagadnienia związane z separacją w rozwiązaniach iskrobezpiecznych zostały bardziej szczegółowo opisane w [9].

Możliwe jest również wykorzystywanie sterowanych elementów półprzewodnikowych, co pozwala realizować układy ograniczające, które w mniejszym stopniu wpływają na funkcjonalność kosztem wzrostu stopnia skomplikowania zarówno układu ogranicznika, jak i wykazania jego zgodności z normą.

Wyraźna tendencja zmierzająca do redukcji poboru energii przez układy elektroniczne, będąca jednym z efektów trwającego na przestrzeni lat ich rozwoju, jest bardzo korzystna dla realizacji bezpieczeństwa przeciwwybuchowego konstrukcji urządzeń elektronicznych poprzez zapewnienie iskrobezpieczeństwa, ponieważ pozwala w danym limicie dostarczanej mocy uzyskać szerszą lub lepszą jakościowo funkcjonalność. Pod tym względem jednak w odniesieniu do układów analogowych postęp nie jest już tak znaczny jak dla układów cyfrowych, co przynajmniej częściowo kompensowane jest poprzez coraz częstsze stosowanie rozwiązań cyfrowych tam, gdzie wcześniej stosowano rozwiązania analogowe.

Punkt 5.6.3 normy [8] dotyczy klasyfikacji temperaturowej oprzewodowania wewnętrznego. Dopuszczalny prąd, jaki ze względu na samonagrzewanie się może płynąć przez przewód o określonych parametrach jest zdefiniowany wzorem lub w przypadku oprzewodowania miedzianego wartościami zamieszczonymi w tabeli 2 normy [8].

Punkt 5.6.4 normy [8] dotyczy klasyfikacji temperaturowej ścieżek obwodów drukowanych, których klasyfikacja powinna być określana z użyciem dostępnych danych lub właściwych pomiarów, natomiast w przypadku miedzianych ścieżek dopuszcza się określenie klasyfikacji temperaturowej z wykorzystaniem tabeli 3 normy [8]. Ograniczanie doprowadzonej mocy jest korzystne również ze względu na klasyfikację temperaturową ścieżek obwodów drukowanych, które można zaliczyć bez badań do klasy temperaturowej T4 lub grupy I, jeżeli maksymalna moc nie przekracza 1,3 W. W przypadku gdy wykluczone jest występowanie pyłu, ścieżki drukowane można zaliczyć bez badań do klasy temperaturowej T4 lub grupy I jeżeli maksymalna moc nie przekracza 3,3 W.

## Aspekty temperaturowe elementów półprzewodnikowych

Analiza termiczna podczas projektowania urządzeń iskrobezpiecznych przeprowadzana jest nie tylko w celu wyznaczenia temperatur powierzchni elementów. Często zachodzi potrzeba doboru elementu półprzewodnikowego pod względem mocy celem zapewnienia jego nieuszkodzalności w rozumieniu normy [8,10]. Dane katalogowe elementów w zakresie ich charakterystyk termicznych nie zawsze są wystarczające i częstym rozwiązaniem jest zakładanie do analizy bardziej niekorzystnych warunków, niż będą miały miejsce w rzeczywistości, co podobnie jak w przypadku opisanych wcześniej uproszczeń wynikających z topologii układu może prowadzić do realizacji w pewnym stopniu przewymiarowanych pod względem termicznym. Na właściwości termiczne, a w szczególności rezystancję termiczną złącze otoczenie wpływa wiele czynników, które trudno uwzględnić dysponując jedynie danymi katalogowymi. Dane katalogowe często uwzględniają tylko szczególne przypadki warunków montażu, jakie z różnych przyczyn nie mogą być odniesione do warunków występujących w rzeczywistej aplikacji.

Optymalnym rozwiązaniem jest wyznaczenie temperatury złącza w rzeczywistych warunkach konkretnej aplikacji. Nie jest to wielkość mierzalna bezpośrednio, natomiast można wyznaczyć ją z wystarczającą dokładnością w sposób pośredni.

Najprostszym i często wystarczającym rozwiązaniem jest zmierzenie temperatury obudowy albo wyprowadzenia elementu półprzewodnikowego w warunkach jego docelowego montażu przy doprowadzeniu do niego zadanej mocy i ustalonym rozkładzie temperatury. Przy znanej temperaturze otoczenia i znanej rezystancji termicznej złącze otoczenie albo złącze obudowa możliwe jest obliczenie temperatury złącza, zwykle z zadowalającą dokładnością. Przy stosowaniu tej metody należy zapewnić jak najlepsze sprzężenie termiczne pomiędzy elementem mierzonym a pomiarowym (którym zwykle jest termopara), przy czym wpływ samego elementu pomiarowego powinien być jak najmniejszy, aby nie obniżał temperatury mierzonego elementu. Z tego względu metoda jest tym dokładniejsza, czym większa jest dysproporcja pomiędzy elementem którego temperatura jest mierzona a elementem pomiarowym i jego doprowadzeniami. W niektórych przypadkach pomocne może być zastosowanie pirometru lub kamery termowizyjnej pod warunkiem odpowiedniej kalibracji. Pomiar może być dokonywany również w celu wyznaczenia samej temperatury powierzchni (nie tylko jako etap pośredni wyznaczania temperatury złącza), wówczas może mieć zastosowanie do wszystkich innych elementów (nie tylko półprzewodnikowych).

Druga, znacznie dokładniejsza metoda wykorzystuje zależność napięcia przewodzenia złącza półprzewodnikowego przy zadanym prądzie przewodzenia od jego temperatury. W pierwszym etapie mierzone jest napięcie na złączu ( $U_f$ ) przy zadanym prądzie przewodzenia przy dwóch różnych, znanych i ustalonych temperaturach ( $T_j$ ) celem wyznaczenia na podstawie dwóch punktów liniowej charakterystyki  $U_f = f(T_j)$ . Zadany prąd pomiarowy powinien być wystarczająco mały, aby moc dostarczona była znikoma, co pozwala przyjąć temperaturę złącza równą zadanej temperaturze otoczenia. W drugim etapie do elementu półprzewodnikowego doprowadzana jest zadana moc (wynikająca z układu w którym element ma się znajdować oraz kombinacji uszkodzeń), a po uzyskaniu ustalonego rozkładu temperatury następuje wymuszenie prądu o wartości, dla której wyznaczana była charakterystyka i przy tym wymuszeniu mierzone jest

napięcie na złączu, którego temperatura wynika w tym momencie z mocy, jaka była w nim wydzielana bezpośrednio wcześniej. Na podstawie wyznaczonej w pierwszym etapie charakterystyki wyznaczana jest temperatura złącza, a przy znanej temperaturze otoczenia możliwe jest precyzyjne wyznaczenie rezystancji termicznej złącze otoczenie elementu w danych warunkach montażu w konkretnej aplikacji. Metodę tą można stosować jednak tylko do elementów dla których z poziomu ich zacisków zewnętrznych dostępne jest złącze p-n (diody, diody Zenera, tranzystory bipolarne, tranzystory IGBT, tranzystory MOSFET z wewnętrzną diodą). Ze względu na znacznie różniące się właściwości i parametry różnych elementów stanowisko pomiarowe powinno umożliwić parametryzację poszczególnych wielkości: temperatury otoczenia, prądu, przy którym mierzone jest napięcie złącza oraz mocy dostarczanej do elementu.

Niezależnie od zastosowanej metody konieczne jest uwzględnienie docelowej temperatury otoczenia.

Dopuszczalnym rozwiązaniem jest także stosowanie bezpieczników termicznych, sprzężonych termicznie z zabezpieczanymi elementami i przerywającymi obwód w przypadku osiągnięcia odpowiedniej temperatury. Pozwalają stosować elementy zabezpieczane o niższej mocy znamionowej, przy czym konieczne jest wykazanie zadziałania bezpiecznika termicznego przy temperaturze zabezpieczanego elementu niższej niż dopuszczalna. Dodatkową zaletą tego rozwiązania jest możliwość zabezpieczenia jednym bezpiecznikiem termicznym kilku elementów, w zależności od sposobu montażu i realizacji sprzężenia termicznego. W przypadku transformatorów sieciowych dopuszczalne jest również stosowanie rozwiązań fabrycznie wyposażonych w odpowiednie bezpieczniki termiczne.

W celu zmniejszenia zdolności zapłonowej gorących części, zgodnie z punktem 6.6.2 normy [8] dopuszczalne jest również stosowanie hermetyzacji w postaci zalewy. W takim przypadku oprócz spełnienia wymagań dotyczących hermetyzacji opisanych w punkcie 6.6 normy [8], objętość i grubość zalewy powinna dodatkowo zmniejszać maksymalną temperaturę powierzchni zalewy do pożądanej wartości. Istotne w tym przypadku są uwagi zamieszczone w załączniku D normy [8]:

- „Wszystkie zalewy mają maksymalną temperaturę, powyżej której mogą tracić lub zmieniać wymagane własności. Takie zmiany mogą spowodować spękanie lub rozkład, co może skutkować wystąpieniem powierzchni gorętszych niż zewnętrzna powierzchnia zalewy, narażonej na działanie atmosfery wybuchowej.

- Należy zaznaczyć, że elementy hermetyzowane zależnie od przewodności cieplnej zalewy, mogą być gorętsze lub zimniejsze, niż gdyby znajdowały się w powietrzu.”

Z tego względu w przypadku stosowania hermetyzacji elementów nieuszkodzalnych w rozumieniu normy [8], przy analizie nieuszkodzalności konieczne jest również uwzględnienie wpływu zalewy na temperatury tych elementów. Jeżeli temperatura osiągnięta przez te elementy może być bliska dopuszczalnej, wskazane jest przeprowadzenie odpowiednich pomiarów w sposób analogiczny do opisanego w poprzednim punkcie.

Również opisane uprzednio bezpieczniki termiczne stosowane są często w połączeniu z hermetyzacją w taki sposób, że są one umieszczone blisko zabezpieczanych elementów w zalewie o wysokiej przewodności cieplnej, co zapewni dobre sprzężenie termiczne pomiędzy bezpiecznikiem a zabezpieczanymi elementami, przy czym zadziałanie bezpiecznika powinno następować przed osiągnięciem przez element lub przez powierzchnię zalewy temperatury niższej od dopuszczalnej.

## Rezystancja termiczna diod Zenera jako równoległych ograniczników napięcia

W urządzeniach iskrobezpiecznych są często stosowane równoległe ograniczniki napięcia w postaci równoległych diod Zenera. Najczęściej popełnianym błędem jest dobór diod Zenera na podstawie znamionowej dopuszczalnej mocy wydzielanej. Z danych katalogowych diod serii 1N5333B - 1N5388B firmy On Semiconductor [11], maksymalna temperatura złącza  $T_{Jmax}$  wynosi 200 °C, moc maksymalna wydzielana jest mniejsza od 5 W a dla długości wyprowadzeń 5 mm ( $\sim 0,2''$ ) rezystancja termiczna złącze - wyprowadzenie  $R_{\theta J-L}$  wynosi 12,5 C/W. Na podstawie danych literaturowych dla obudowy 017AA rezystancja termiczna wyprowadzenie - otoczenie  $R_{\theta L-A}$  wynosi 30 C/W. Zatem maksymalna dopuszczalna moc jaką można wydzielić w typowej temperaturze otoczenia dla urządzeń iskrobezpiecznych  $T_A = 40$  °C nie powodująca przekroczenia maksymalnej temperatury złącza diody Zenera wynosi:

$$(1) P_{DS40\_OnSemiconductor\_dop}(1N53xx) = \frac{T_{Jmax} - T_A}{R_{\theta J-L} + R_{\theta L-A}}$$

gdzie:  $T_{Jmax}$  – maksymalna temperatura złącza,  $T_A$  – temperatura otoczenia,  $R_{\theta J-L}$  – rezystancja termiczna złącze – wyprowadzenie,  $R_{\theta L-A}$  – rezystancja termiczna wyprowadzenie - otoczenie.

(2)

$$P_{DS40\_OnSemiconductor\_dop}(1N53xx) = \frac{200^{\circ}C - 40^{\circ}C}{12,5 \frac{^{\circ}C}{W} + 30 \frac{^{\circ}C}{W}} = 3,76W$$

Powyższy wynik ma bardzo dobre odzwierciedlenie w praktyce. Diody serii 1N53xx spełniają wymagania punktów 7.5.2 oraz 7.1 PN EN 60079 11:2012 [PN-EN] dla elementów nieuszkodzalnych wynikający z dopuszczalnej mocy wydzielanej w diodzie w awaryjnych warunkach przy ograniczeniu mocy doprowadzonej poniżej 2,5 W oraz przy uwzględnieniu współczynnika bezpieczeństwa 1,5 ( $1,5 \times 2,5 W = 3,75 W$ ). Osoby pracujące w jednostkach certyfikacyjnych potwierdzają zgodność tego twierdzenia bez potrzeby przeprowadzenia badań. W praktyce wydzielanie mocy dla tej serii firmy On Semiconductor w wyżej opisanych warunkach większej niż 3,76 W w miarę zbliżania się do wartości 4 W powinno się zlecić badania oraz przewidzieć w swojej konstrukcji zwiększenie powierzchni radiacyjnej i/lub zastosowanie hermetyzacji celem zmniejszenia rezystancji termicznej.

W podobnym jak powyżej przypadku dla diod Zenera 5 W SMBJ5338B firmy Microsemi montowanych powierzchniowo maksymalna dopuszczalna moc do wydzielenia przy zachowaniu zalecanych przez producenta powierzchni radiacyjnych wynosi tylko 1,22 W.

$$(3) P_{DS40\_MicroSemi\_dop}(SMBJ5333) = \frac{T_{Jmax} - T_A}{R_{\theta J-A}}$$

gdzie:  $T_{Jmax}$  – maksymalna temperatura złącza,  $T_A$  – temperatura otoczenia,  $R_{\theta J-A}$  – rezystancja termiczna złącze – otoczenie.

(4)

$$P_{DS40\_MicroSemi\_dop}(SMBJ5333) = \frac{150^{\circ}C - 40^{\circ}C}{90 \frac{^{\circ}C}{W}} = 1,22W$$

W tabeli 3 można znaleźć kolejne źródło potencjalnej pułki – ten sam typ diody różnych producentów posiada inną maksymalną temperaturę złącza (nawet dla tych samych warunków montażu i typów obudowy), co implikuje inną maksymalną dopuszczalną moc w tych samych warunkach.

Tabela 3. Porównanie dopuszczalnych mocy w temperaturze otoczenia  $T_a = 40^\circ\text{C}$  dla znamionowych powierzchni radiacyjnych określanych przez producentów 5W diod Zenera przy uwzględnieniu współczynnika bezpieczeństwa 1,5.

Typ Seria	Producent	Obudowa	$R_{\theta J-A}$ [ $^\circ\text{C}/\text{W}$ ]	$T_J$ [ $^\circ\text{C}$ ]	Maksymalna dopuszczalna moc [W] w $T_A = 40^\circ\text{C}$
1N5333B – 1N5388B	On Semiconductor	017AA	42,5	200	3,76
1N5333B – 1N5388B	Microsemi	T-18	42,5	150	2,93
SMBJ5338B – SMBJ5388B	Microsemi	DO-215AA (SMB)	90	150	1,22
SMBJ5338B – SMBJ5388B	<b>M C C</b> *	DO-214AA (SMB)	90	150	1,22
Z5SMC5334B – Z5SMC5369B	Taitron	DO-214AB (SMC)	110	150	1,00

\* Micro Commercial Components

Celem pełniejszego zaznajomienia się z opisywaną problematyką należy zapoznać się z danymi katalogowymi tych samych typów diod różnych producentów w poszczególnych okresach czasu i skonfrontowanie ich z historią samych producentów. Zmniejszanie rezystancji termicznej wyprowadzenie – otoczenie  $R_{\theta L-A}$  mniejszej diody Zenera SMD serii SMBJ53xxB uzyskiwane poprzez zwiększanie powierzchni chłodzenia przeważnie prowadzi do sytuacji, w której zastosowanie większej przewlekanej diody 1N53xxB będzie wymagało mniejszej powierzchni na obwodzie drukowanym.

Dla diody SMBJ53xxB rezystancja termiczna złącze - wyprowadzenie  $R_{\theta J-L}$  wynosi 25 C/W zatem, aby wydzielić w niej moc 4 W bez zniszczenia jej złącza musiałby być zapewnione odprowadzenie ciepła tak, aby rezystancja termiczna wyprowadzenie – otoczenie wynosiła:

$$(5) R_{\theta L-A}(SMBJ5333) = \frac{T_{Jmax} - T_A}{P_{DS40\_MicroSemi\_dop}} - R_{\theta J-L}$$

gdzie:  $T_{Jmax}$  – maksymalna temperatura złącza,  $T_A$  – temperatura otoczenia,

$R_{\theta J-L}$  – rezystancja termiczna złącze – wyprowadzenie,  $P_{DS40}$  – moc dopuszczalna diody w temperaturze 40  $^\circ\text{C}$ .

$$(6) R_{\theta L-A}(SMBJ5333) = \frac{150^\circ\text{C} - 40^\circ\text{C}}{4\text{W}} - 25 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}} = 2,5 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

Wynik powyższy sugeruje, że zastosowanie tej diody w aplikacji miałyby sens tylko w przypadku, gdy producent urządzeń posiada wysoki ich stan magazynowy wraz możliwością ponoszenia kosztów odprowadzenia ciepła.

### Podsumowanie

W artykule przedstawiono ogólnie formalne aspekty projektowania urządzeń, których budowa przeciwybuchowa osiągana jest poprzez iskrobezpieczeństwo. W dalszej części bardziej szczegółowo rozważone zostały zagadnienia związane z temperaturą elementów i powierzchni. Przedstawiono wymagania stawiane w tym zakresie przez normę oraz przewidziane środki i sposoby ich spełnienia w powiązaniu z praktycznymi i stosowanymi możliwościami rozwiązywania zaistniałych problemów. W przypadku zagadnień temperaturowych nie zawsze istnieje analityczna możliwość wykazania zgodności z danym wymogiem normy. Wynika to głównie ze zbytniego uproszczenia modelu, który nie uwzględnia wszystkich występujących w rzeczywistości czynników, a częściowo również z

niewystarczających danych dostępnych np. w kartach katalogowych. Często byłoby to możliwe dopiero po przyjęciu wielu założeń upraszczających, ale prowadzących do przyjęcia bardziej niekorzystnego przypadku, co nie zawsze jest akceptowalne. Wówczas preferowanym sposobem może być przeprowadzenie stosownych badań i pomiarów, prowadzących zwykle do uzyskania bardziej optymalnego rozwiązania.

**Autorzy:** mgr inż. Sławomir Chmielarz, Instytut Techniki Innowacyjnych EMAG, ul. Leopolda 31, 40-189 Katowice, e-mail: [Slawomir.Chmielarz@ibemag.pl](mailto:Slawomir.Chmielarz@ibemag.pl); mgr inż. Tomasz Molenda, Instytut Techniki Innowacyjnych EMAG, ul. Leopolda 31, 40-189 Katowice, e-mail: [Tomasz.Molenda@ibemag.pl](mailto:Tomasz.Molenda@ibemag.pl); mgr inż. Wojciech Korski, Instytut Techniki Innowacyjnych EMAG, ul. Leopolda 31, 40-189 Katowice, e-mail: [Wojciech.Korski@ibemag.pl](mailto:Wojciech.Korski@ibemag.pl); mgr inż. Krzysztof Oset, Instytut Techniki Innowacyjnych EMAG, ul. Leopolda 31, 40-189 Katowice, e-mail: [Krzysztof.Oset@ibemag.pl](mailto:Krzysztof.Oset@ibemag.pl).

### LITERATURA

- [1] Dyrektywa parlamentu europejskiego i rady 2014/34/UE z dnia 26 lutego 2014 r.
- [2] 94/9/WE (Dyrektywa ATEX), Urządzenia i systemy ochronne przeznaczone do użytku w przestrzeniach zagrożonych wybuchem.
- [3] Dyrektywa parlamentu europejskiego i rady 2014/30/UE z dnia 26 lutego 2014 r.
- [4] 2004/108/WE (Dyrektywa EMC), Kompatybilność elektromagnetyczna
- [5] 73/23/EWG (Dyrektywa LVD), Niskonapięciowe wyroby elektryczne.
- [6] Wytoczne stosowania dyrektywy rady 73/23/EEC (Wyposażenie elektryczne skonstruowane do stosowania w ramach pewnego zakresu napięcia) [dostęp 19.02.2018]. Dostępny w Internecie, [www.wug.gov.pl/download/119](http://www.wug.gov.pl/download/119)
- [7] PN-EN 60079-0:2013-03 + A11:2014-03, Atmosfery wybuchowe -- Część 0: Urządzenia -- Podstawowe wymagania, 2015-08-27
- [8] PN-EN 60079-11:2012, Atmosfery wybuchowe -- Część 11: Zabezpieczenie urządzeń za pomocą iskrobezpieczeństwa "I", 2015-02-05
- [9] Molenda T., Chmielarz S., Separacja galwaniczna – wybrane aspekty ATEX, *Mining – Informatics, Automation and Electrical Engineering*, 522 (2015), n.2, 80-86
- [10] Chmiel M., Mularczyk W., Podstawy projektowania iskrobezpiecznych urządzeń elektronicznych w oparciu o dyrektywę nowego podejścia, *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, 529 (2017), n.1, 160-165
- [11] Karta katalogowa diod Zenera serii 1N53 firmy On Semiconductor, [dostęp 22.03.2018]. Dostępny w Internecie, <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/1N5333B-D.PDF>