

OCENA ZAGROŻENIA PIORUNOWEGO I PODSTAWOWE ZASADY OCHRONY W STREFACH ZAGROŻONYCH WYBUCHEM

Dr hab. inż. Andrzej Sowa
Politechnika Białostocka

Podstawowym zadaniem urządzenia piorunochronnego jest przejście i odprowadzenie do ziemi prądu piorunowego w sposób bezpieczny dla ludzi oraz eliminujący możliwość uszkodzenia chronionego obiektu budowlanego oraz urządzeń w nim zainstalowanych. Szczególnie niebezpieczne są wyładowania piorunowe w obiekty zawierające strefy zagrożone pożarem lub wybuchem. W takich przypadkach zapewnienie w czasie burzy bezpieczeństwa ludzi i urządzeń wymaga posiadania podstawowych informacji o:

- występującym zagrożeniu piorunowym i sposobie oceny tego zagrożenia,
- zaleceniach dotyczących zasad ochrony odgromowej zawartych w odpowiednich normach,
- zasadach ograniczania przepięć w instalacjach niskonapięciowych ze szczególnym uwzględnieniem obwodów iskrobezpiecznych.

Poniżej przedstawione zostaną podstawowe informacje dotyczące powyższych problemów.

1. Normy i zalecenia związane z ochroną odgromową

Wykorzystywane obecnie w kraju normy dotyczące ochrony odgromowej zestawione w tabeli 1. W normach wprowadzonych w latach 2001-2002 brak szczegółowych zaleceń dotyczących ochrony odgromowej obiektów i urządzeń technologicznych zagrożonych wybuchem mieszanin gazów z powietrzem. W przypadku takich obiektów należy stosować zalecenia zawarte zarówno w normie PN-89/E-05003/03, jak i wymagania dotyczące wyboru poziomów ochrony, oceny ryzyka oraz podstawowych zaleceń związanych z instalacją piorunochronną zawarte w nowowprowadzonych normach. Należy zaznaczyć, że norma PN-89/E-05003/03 określa podstawowe sposoby ochrony dla większości sytuacji występujących w rzeczywistości. Uściślenia wymagają jedynie przypadki, w których występują odstępstwa od normy wymagające w przyszłości opracowania szczegółowych wytycznych.

W roku 2006, z celu ujednoczenia istniejących norm i zaleceń, wprowadzono w Unii Europejskiej, a następnie w Polsce (obecnie jako normy uznaniowe), cztery normy omawiające całość zagadnień ochrony odgromowej. Są to normy:

1. PN-EN 62305-1:2006(U), Ochrona odgromowa - Część 1: Wymagania ogólne.
2. PN-EN 62305-2:2006(U), Ochrona odgromowa - Część 2: Zarządzanie ryzykiem.
3. PN-EN 62305-3:2006(U), Ochrona odgromowa - Część 3: Uszkodzenia fizyczne obiektów budowlanych i zagrożenie życia.
4. PN-EN 62305-4:2006(U), Ochrona odgromowa - Część 4: Urządzenia elektryczne i elektroniczne w obiektach budowlanych.

W nowym podejściu do zagadnień ochrony zwraca się większą uwagę na ocenę występującego ryzyka różnorodnych zagrożeń. Takie podejście dotyczy również obiektów zagrożonych wybuchem. W przypadku zagrożenia piorunowego takich obiektów ryzyko wybuchu zależy od prawdopodobieństwa bezpośredniego wyładowania piorunowego w obiekt lub dochodzące do obiektu instalacje, wystąpienia iskrzenia wywołanego przez przepływ prądu piorunowego w miejscach występowania atmosfery wybuchowej oraz prawdopodobieństwa wywołania wybuchu przez powstałe przeskokki iskrowe.

Tabela 1. Zestawienie podstawowych norm dotyczących ochrony odgromowej

Zakres tematyczny	Zestawienie norm
Normy ochrony odgromowej obowiązujące przed rokiem 2001.	<p>PN-86/E-05003/01: <i>Ochrona odgromowa obiektów budowlanych. Wymagania ogólne.</i></p> <p>PN-89/E-05003/03 <i>Ochrona odgromowa obiektów budowlanych. Ochrona obostrzona</i></p> <p>PN-92/E-05003/04: <i>Ochrona odgromowa obiektów budowlanych. Ochrona specjalna</i></p>
Ochrona odgromowa obiektów budowlanych	<p>PN-IEC 61024-1:2001, <i>Ochrona odgromowa obiektów budowlanych. Zasady ogólne.</i></p> <p>PN-IEC 61024-1:2001/Ap1 grudzień 2002, <i>Ochrona odgromowa obiektów budowlanych. Część 1. Zasady ogólne.</i></p> <p>PN-IEC 61024-1-1:2001, <i>Ochrona odgromowa obiektów budowlanych. Zasady ogólne. Wybór poziomów ochrony dla urządzeń piorunochronnych.</i></p> <p>PN-IEC 61024-1-1:2001/Ap1 grudzień 2002, <i>Ochrona odgromowa obiektów budowlanych. Zasady ogólne. Wybór poziomów ochrony dla urządzeń piorunochronnych.</i></p> <p>PN-IEC 61024-1-2:2002, <i>Ochrona odgromowa obiektów budowlanych. Zasady ogólne. Przewodnik B – Projektowanie, montaż, konserwacja i sprawdzanie urządzeń piorunochronnych.</i></p>
Elementy instalacji piorunochronnej	<p>PN-EN 50164-1:2002U, <i>Elementy urządzenia piorunochronnego (LPS) Część 1: Wymagania stawiane elementom połączeniowym.</i></p> <p>PN-EN 50164-2:2003(U) <i>Elementy urządzenia piorunochronnego (LPS). Część 2: Wymagania dotyczące przewodów i uziomów</i></p>
Ochrona przed piorunowym impulsem elektromagnetycznym	<p>PN-IEC 61312-1:2001, <i>Ochrona przed piorunowym impulsem elektromagnetycznym. Zasady ogólne.</i></p> <p>PN-IEC/TS 61312-2:2002, <i>Ochrona przed piorunowym impulsem elektromagnetycznym (LEMP). Część 2. Ekranowanie obiektów, połączenia wewnątrz obiektów i uziemienia.</i></p> <p>PN-IEC/TS 61312-3:2003, <i>Ochrona przed piorunowym impulsem elektromagnetycznym. Część 3. Wymagania urządzeń do ograniczania przepięć (SPD).</i></p>

W normach serii PN-EN 62305 podstawowe informacje o ochronie obiektów zagrożonych wybuchem można znaleźć w części 2 i 3. Konieczność stosowania ochrony odgromowej i ochrony przed przepięciami stwierdzono również w rozporządzeniach. Część z nich dotyczących obiektów, w których mogą znajdować się strefy zagrożone wybuchem zestawiono w tabeli 2.

1.1. Norma PN-EN 62305-3

Podstawowe informacje dotyczące ochrony odgromowej obiektów zagrożonych wybuchem znajdują się w normach PN-89/E-05003/03 i PN-EN 62305-3.

Niestety występują w nich różnice w oznaczeniach stref zagrożonych wybuchem (Tabela 3), które należy uwzględnić przy prowadzonej analizie. Poniżej, zasygnalizowano podstawowe wymagania ochrony odgromowej w strefach zagrożonych wybuchem, jakie wprowadza norma PN-EN 62395-3.

Tabela 2. Rozporządzenia zawierające zalecenia dotyczące ochrony odgromowej i przepięciowej

Rozporządzenie	Podstawowe wymagania
<p>Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 30.07. 2001 r. w sprawie warunków technicznych jakim powinny odpowiadać sieci gazowe (Dz.U.2001, Nr 97,poz.1055).</p>	<p>Rozdział 3 - Stacje gazowe</p> <p>§ 53.1. Stacja gazowa powinna być zabezpieczona przed wylądowaniami i przepięciami elektrycznymi.</p> <p>Rozdział 4 - Tłocznie gazu</p> <p>§ 78. Obiekty tłoczni powinny być wyposażone w:</p> <p>.....</p> <p>5) instalację ochrony odgromowej i przeciw-porażeniowej.</p>
<p>Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 21.11.2005 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać bazy i stacje paliw płynnych, rurociągi przesyłowe dalekosiężne służące do transportu ropy naftowej i produktów naftowych i ich usytuowanie (Dz. U. 1996, Nr 103, poz. 477)</p>	<p>Dział II - Bazy paliw płynnych</p> <p>Rozdział 4 - Zabezpieczenie bazy paliw płynnych</p> <p>§ 41.2. Zbiorniki, a także obiekty technologiczne i budynki powinny być chronione przed wylądowaniami atmosferycznymi, elektrycznością statyczną oraz przepięciami, zgodnie z wymaganiami określonymi w Polskich Normach.</p> <p>Dział IV – Stacje paliw płynnych i stacje kontenerowe</p> <p>Rozdział 3 – Zabudowa stacji paliw płynnych</p> <p>§ 107. Zadaszenia, o którym mowa w § 106, powinny być wyposażone w instalację odgromową wykonaną zgodnie z wymaganiami określonymi w Polskich Normach.</p>

Tabela 3. Oznaczenia rodzajów stref wybuchowych

Zgodnie z normą PN-89/E-05003/03	Zgodnie z normą EPN-EN 62305-3
<p>Kategoria Z0 – obszar, w którym mieszanina wybuchowa gazów i/lub par cieczy łatwopalnych z powietrzem występuje stale lub długotrwale.</p>	<p>Strefa 0 – miejsce, w którym atmosfera wybuchowa zawierająca mieszaninę substancji palnych w postaci gazu, pary lub mgły z powietrzem występuje stale lub przez długie okresy lub często.</p>
<p>Kategoria Z1 – obszar, w którym istnieje prawdopodobieństwo wystąpienia mieszaniny wybuchowej gazów i/lub par cieczy łatwopalnych z powietrzem w normalnych warunkach pracy.</p>	<p>Strefa 1 – miejsce, w którym atmosfera wybuchowa zawierająca mieszaninę substancji palnych w postaci gazu, pary lub mgły z powietrzem może czasami wystąpić w trakcie normalnego działania.</p>
<p>Kategoria Z2 – obszar, w którym wystąpienie mieszaniny wybuchowej gazów i/lub par cieczy łatwopalnych z powietrzem jest mało prawdopodobne, a jeśli mieszanina ta wystąpi, to będzie utrzymywana krótkotrwale.</p>	<p>Strefa 2 – miejsce, w którym atmosfera wybuchowa zawierająca mieszaninę substancji palnych w postaci gazu, pary lub mgły z powietrzem nie występuje w trakcie normalnego działania, a w przypadku wystąpienia trwa krótko.</p>
<p>Kategoria Z10 – obszar, w którym mieszanina wybuchowa pyłów palnych z powietrzem występuje długotrwale lub często.</p>	<p>Strefa 20 – miejsce, w którym atmosfera wybuchowa w postaci obłoku palnego pyłu w powietrzu występuje stale lub przez długie okresy lub często</p>
<p>Kategoria Z11 – obszar, w którym zalegające pyły mogą stworzyć krótkotrwale mieszaninę wybuchową na skutek przypadkowego zawirowania.</p>	<p>Strefa 21 – miejsce, w którym atmosfera wybuchowa w postaci obłoku palnego pyłu w powietrzu może czasami wystąpić w trakcie normalnego działania.</p>
	<p>Strefa 22 – miejsce, w którym atmosfera wybuchowa w postaci obłoku palnego pyłu w powietrzu nie występuje w trakcie normalnego działania, a w przypadku wystąpienia trwa krótko.</p>

- Poszczególne części zewnętrznego urządzenia piorunochronnego (zwody, przewody odprowadzające i uziemiające) powinny się znajdować w odległości, co najmniej 1 m od strefy zagrożonej wybuchem.
- Jeśli zachowanie odległości 1 m jest niemożliwe do wykonania to można ją zmniejszyć do ok. 0,5 m, ale przewody powinny być ciągłe lub zastosowane połączenia spawane, zgrzewane lub wykonane przy pomocy urządzeń dociskających.
- Strefy zagrożone wybuchem nie powinny się znajdować bezpośrednio pod metalowym pokryciem dachu, jeśli możliwa jest jego perforacja lub mogą wystąpić przeskoki iskrowe pomiędzy poszczególnymi elementami pokrycia.
- Minimalne grubości blach, które można wykorzystać do odprowadzania prądu piorunowego zestawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Minimalne grubości blach stosowanych w urządzeniach technologicznych do odprowadzenia prądu piorunowego

Materiały	Zalecana minimalna grubość blachy (mm)	
	Zgodnie z PN-EN 62305-3	
Ołów	2,0 *	-
Stal (nierdzewna ocynkowana)	0,5*	4**
Tytan	0,5*	4**
Miedź	0,5*	5**
Aluminium	0,65*	7**
Cynk	0,7*	-

przy czym:

- * - istnieje możliwość wytopienia otworu w blasze w punkcie wpłynięcia prądu piorunowego,
- ** - w miejscu wpłynięcia prądu piorunowego wystąpi jedynie wzrost temperatury blachy.

- Połączenia wyrównawcze wykonane przy pomocy zacisków są dopuszczalne, jeśli nie będzie iskrenia przy przepływie prądów piorunowych. Podobnie należy wykonać połączenia z rurami (obejmy lub inny sposób, ale bez wyładowań między elementami).
- Ogólne zasady ochrony w obiektach zawierających strefy 0, 1, 2 oraz 20, 21 i 22 zestawiono w tabeli 5.

Dodatkowo w normie zawarto ogólne zalecenia dotyczące:

- uziemiańia zbiorników,
- sposobów połączeń ścian zbiornika z pływającym dachem,
- uziemiańia rurociągów.

2. Ocena ryzyka szkód piorunowych

Miarą zagrożenia piorunowego obiektu oraz skuteczności zastosowanych środków ochrony odgromowej jest ryzyko spodziewanych szkód *R*. Szczegółową metodykę analizy oraz oceny uszkodzeń powodowanych przez wyładowania piorunowe zawarto w normie ochrony odgromowej IEC 62305-2.

W tabeli 6 zestawiono wyróżnione w normie źródła zagrożeń, rodzaje szkód i strat.

Tabela 5. Zestawienie podstawowych wymagań w przypadku Stref zagrożonych wybuchem

Strefy 2 i 22	Strefy 1 i 21	Strefy 0 i 20
<p>Obiekty zawierające strefy 2 i 22 nie wymagają dodatkowej ochrony (uzupełnienia ochrony). W przypadku metalowych urządzeń, obiektów technologicznych poza budynkami np. reaktory, zbiorniki, które posiadają ścianki wykonane z materiałów grubości zgodnej z danymi z tabeli 4 stosujemy następujące zalecenia:</p> <ul style="list-style-type: none"> nie są wymagane zwody, obiekty powinny być uziemione zgodnie w wymogami norm. 	<p>Ochrona powinna być wykonana analogicznie jak w przypadku stref 2 i 22 z następującymi uzupełnieniami:</p> <ul style="list-style-type: none"> odstępy izolujące (bezpieczne) lub inne części izolujące powinny być poza strefą, wstawki izolacyjne Np w rurociągach powinny być odpowiednio chronione – Np. można zastosować dodatkowe iskierniki równoległe do wstawek. 	<p>Analogicznie jak w strefach 1 i 21 ale należy zastosować dodatkowe uzupełnienia:</p> <ul style="list-style-type: none"> połączenia wyrównawcze wykorzystywane do celów ochrony odgromowej pomiędzy elementami instalacji piorunochronnej a innymi instalacjami należy wykonać w porozumieniu z operatorami tych instalacji, połączenia wyrównawcze wykorzystujące iskierniki należy również wykonać za porozumieniem z operatorów systemów
<p>Wolnostojące obiekty technologiczne zawierające strefy 0 i 20 należy chronić analogicznie jak w przypadku stref 1 i 2 oraz 21 i 22 z następującymi uzupełnieniami:</p> <ul style="list-style-type: none"> urządzenia elektryczne lub elektroniczne wewnątrz zbiorników zawierających płyny łatwopalne powinny być odpowiednie do takich zastosowań, zamknięte zbiorniki (pojemniki) stalowe zawierające strefy 0 i 20 powinny mieć ścianki o grubości co najmniej 5 mm w miejscach prawdopodobnego uderzenia pioruna. W przypadku ścianek cieńszych należ stosować zwody do ochrony przed bezpośrednim wyładowaniem 		

Tabela 6. Zestawienia źródeł zagrożeń, rodzaje szkód i strat

Źródła zagrożeń	Rodzaje szkód
<p>S₁: wyładowania w obiekt; S₂: wyładowania obok obiektu; S₃: wyładowania w urządzenie usługowe; S₄: wyładowania obok urządzenia usługowego.</p>	<p>D₁: porażenie wskutek napięć dotykowych i krokowych, D₂: uszkodzenie mechaniczne, termiczne, chemiczne, pożar, wybuch itp., D₃: uszkodzenie lub zakłócenie pracy systemu wskutek przepięć.</p>
Rodzaje strat	
<p>L₁: utrata życia ludzkiego; L₂: utrata usługi publicznej; L₃: utrata dziedzictwa kulturowego; L₄: utrata wartości ekonomicznej (obiektu i jego zawartości, urządzenia usługowego i jego aktywności).</p>	

Uwzględniając przedstawione źródła zagrożeń *S*, określono komponenty ryzyka uszkodzenia instalacji i urządzeń ukierunkowano na przedstawione w tabeli 7 przyczyn szkód *S*, rodzajów szkód *D* oraz rodzaje strat *L*.

Miarą zagrożenia piorunowego obiektu oraz skuteczności zastosowanych środków ochrony odgromowej jest ryzyko spodziewanych szkód *R*.

Tabela 7. Przyczyny i rodzaje szkód oraz rodzaje strat

Miejsce trafienia	Przyczyna szkody	Obiekt		Instalacje zewnętrzne	
		Rodzaj szkody	Rodzaj straty	Rodzaj szkody	Rodzaj straty
Trafienie w obiekt	S ₁	D ₁ D ₂ D ₃	L ₁ , L ₄ ** L ₁ , L ₂ , L ₃ , L ₄ L ₁ *, L ₂ , L ₄	D ₂ D ₃	L ₂ ', L ₄ ' L ₂ ', L ₄ '
Trafienie w ziemię w pobliżu obiektu	S ₂	D ₃	L ₁ *, L ₂ , L ₄		
Trafienie w instalacje zewnętrzne	S ₃	D ₁ D ₂ D ₃	L ₁ , L ₄ ** L ₁ , L ₂ , L ₃ , L ₄ L ₁ *, L ₂ , L ₄	D ₂ , D ₃	L ₂ ', L ₄ ' L ₂ ', L ₄ '
Trafienie w ziemię w pobliżu instalacji zewnętrznych	S ₄	D ₃	L ₁ *, L ₂ , L ₄	D ₃	L ₂ ', L ₄ '

* - w przypadku szpitali i obiektów o zagrożeniu wybuchem;

** - w przypadku obiektów rolniczych (utrata zwierząt hodowlanych)

W obiektach wyposażonych w środki ochrony odgromowej to ryzyko jest zwykle znacznie mniejsze od jedności. Przyjmuje się, że w takich przypadkach ryzyko powstania szkody może być wyznaczone z przybliżonej zależności:

$$R = N \cdot P \cdot L$$

gdzie: N – średnia roczna liczba wyładowań oddziałujących na obiekt, urządzenia i wychodzące z niego instalacje,

P – prawdopodobieństwo wywołania przez pojedyncze wyładowanie określonej szkody lub zakłócenia, które nie jest tolerowane przez urządzenia lub instalacje w obiekcie,

L – współczynnik pozwalający oszacować rozmiary powstałej szkody.

Zgodnie z koncepcją zawartą w normie IEC 62305-2, ryzyko dla danego przypadku szkody lub straty jest sumą odpowiednich komponentów ryzyka, z których każdy może być wyznaczony na podstawie przedstawionego wzoru.

Wyznaczone ryzyko należy porównać z ryzykiem tolerowanym R_T i na tej podstawie ocenić poprawność rozwiązania ochrony odgromowej. Należy zauważyć, że urządzenia piorunochronne w obiektach zagrożonych wybuchem powinny spełniać wymagania, co najmniej II poziomu ochrony.

3. Zagrożenie stwarzane przez prąd piorunowy

Tworząc urządzenie piorunochronne należy uwzględnić zagrożenie stwarzane przez przepływ prądów piorunowych, warunki atmosferyczne oraz rodzaj działalności człowieka wewnątrz obiektu. Podczas bezpośredniego wyładowania piorunowego w obiekt budowlany zwody na dachu oraz, w przypadku wysokiego obiektu, na ścianach narażone są na:

- erozję termiczną w miejscu kontaktu przewodu z kanałem wyładowania piorunowego,
- rozżarzenie przewodów wywołane przez przepływ prądu piorunowego.

Erozja termiczna prowadzi do wytapiania przewodów, ich ewentualnego przerywania oraz do perforacji cienkich blach.

Możliwość określenia przyrostu temperatury lub skali ewentualnych uszkodzeń podczas bezpośredniego uderzenia pioruna może być niezwykle istotna w przypadku oceny zagrożeń piorunowych występujących w strefach zagrożonych pożarem lub wybuchem.

3.1. Ciepłne oddziaływanie na przewody

W przypadku klasycznego urządzenia piorunochronnego zagrożeniem może być zarówno rozgrzany przewód, jaki i wytopione z niego krople metalu. Określając kryteria opadania kropeł wytopionego metalu z przewodu przyjęto [1], że wystąpienie tego zjawiska wymaga ubytku połowy masy przewodu na długości równej jego średnicy. Krytyczną wartość ładunku Q_w wymaganą do wytopienia takiej ilości metalu określa równanie:

$$Q_w = \frac{\pi \cdot r^3}{K_e}$$

gdzie: K_e – współczynnik erozji, r - promień przewodu.

Wartości podstawowych parametrów charakteryzujących prąd piorunowy pierwszego i kolejnych doziemnych wyładowań piorunowych oraz składowej długotrwałej prądu piorunowego zestawiono w tabeli 8.

Tabela 8. Wartości podstawowych parametrów charakteryzujących prąd piorunowy wyładowania doziemnego

Składowa wyładowania	Poziom ochrony	Wartości podstawowych parametrów charakteryzujących prąd piorunowy					
		Wartość szczytowa	Kształt	Całkowity ładunek C **	Ładunek impulsowy C *	Energia właściwa kJ/Ω	Czas trwania s
pierwsza składowa	I	200kA	10/350	300 C	100 C	10 000 kJ/Ω	--
	II	150kA	10/350	225 C	75 C	5 600 kJ/Ω	--
	II i IV	100kA	10/350	150 C	50 C	2 500 kJ/Ω	--
kolejne składowe	I	50kA	0,25/100	--	--	--	--
	II	37,5kA	0,25/100	--	--	--	--
	III i IV	25kA	0,25/100	--	--	--	--
długotrwała składowa prądu	I	400A	--	200 C	--	--	0,5
	II	300A	--	150 C	--	--	0,5
	III i IV	200A	--	100 C	--	--	0,5

* - Ponieważ zasadnicza część całkowitego ładunku jest zawarta w pierwszym udarze to uznaje się, że podane wartości zawierają ładunek wszystkich udarów krótkotrwałych,

** - Ładunek całkowity - suma ładunku krótkotrwałego i ładunku składowej długotrwałej prądu.

Uwzględniając, wartości ładunków przenoszonych przez prąd piorunowy można określić średnice przewodów, w których na skutek erozji termicznej może wystąpić zagrożenie stwarzane przez opadające krople metalu.

Przykładowe wyniki obliczeń dla przewodów stalowych, aluminiowych i miedzianych zestawiono w tabeli 9.

Obliczone wartości porównano z wartością ładunku impulsowego, jaki jest zalecany przy tworzeniu urządzenia piorunochronnego zapewniającego I poziom ochrony odgromowej (ładunki impulsowe 100As).

Tabela 9. Krytyczne wartości ładunku dla przewodów wykonanych z różnych materiałów

Średnica przewodu	Ładunek Q (As)		
	Stal	Miedz	Aluminium
5 mm	32,72	18,11	9,82
6 mm	56,64	31,29	16,96
7 mm	89,79	49,70	26,93
8 mm	134,04	74,19	40,21
9 mm	190,85	105,63	57,25
10 mm	261,79	144,90	78,53
11 mm	348,45	192,87	104,53

Uniknięcie spadania kropeł wytopionego metalu wymaga zastosowania przewodów, dla których krytyczne wartości ładunku są większe od 100As (obszar zacieniony na tabeli 2.).

Podwyższenie temperatury przewodu o Δv pod wpływem przepływającego prądu piorunowego można wyznaczyć z zależności [1, 3]:

$$\Delta \vartheta = \frac{1}{\alpha} \left(\exp \frac{W}{S^2 \cdot \gamma \cdot c_w} \cdot \alpha \cdot \rho - 1 \right)$$

gdzie : ρ - rezystywność metalu ($\Omega \cdot m$), γ - gęstość metalu ($kg \cdot m^{-3}$),
 c_w - ciepło właściwe ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$), α - współczynnik temperaturowy (K^{-1}),
 S^2 - przekrój przewodu (m^2).

Do oceny przyrostu temperatury przewodu, jaki nastąpi przy przepływie prądu piorunowego o wartościach uzależnionych od wybranego poziomu ochrony, można wykorzystać dane zestawione w tabeli 10.

Tabela 10. Przyrost temperatury przewodów przy przepływie prądu piorunowego w zależności od ich średnicy materiału, z którego są wykonane oraz przyjętego poziomu ochrony odgromowej

przekrój w mm ²	Aluminium			Stal miękka			Miedz			Stal nierdzewna		
	Przyjęty poziom ochrony											
	III+IV	II	I	III+IV	II	I	III+IV	II	I	III+IV	II	I
4	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
10	564	*	*	*	*	*	169	542	*	*	*	*
16	146	454	*	1120	*	*	56	143	309	*	*	*
25	52	132	283	211	913	*	22	51	98	940	*	*
50	12	28	52	37	96	211	5	12	22	190	460	940
100	3	7	12	9	20	37	1	3	5	45	100	190

* - wzrost temperatury powoduje eksplozję lub stopienie przewodu.

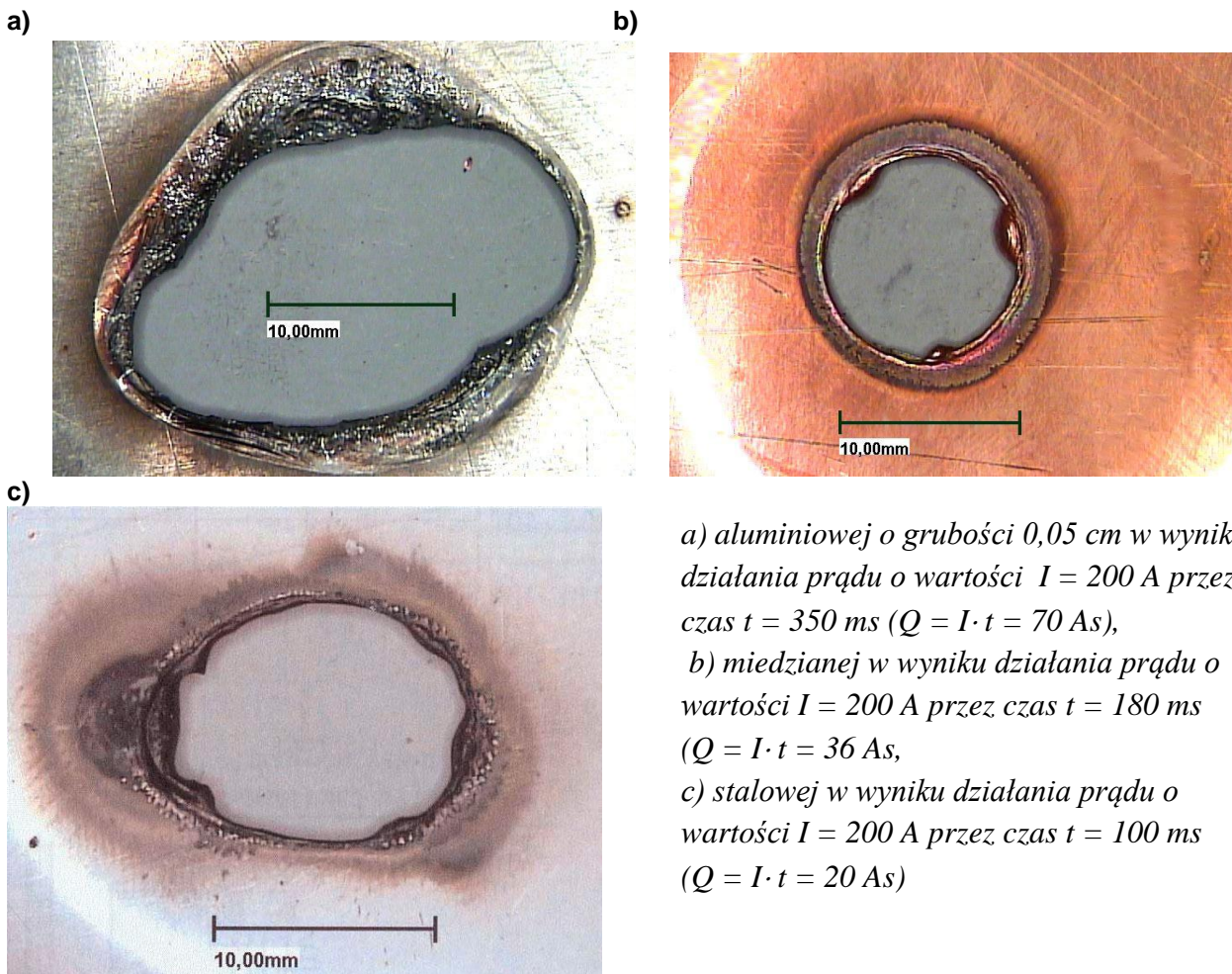
3.2 Erozja termiczna blachy

Głównym czynnikiem prowadzącym do wzrostu temperatury w miejscu stykowym jest energia związana z ładunkiem wyładowania i z przyelektrodowym spadkiem napięcia:

$$W = Q \cdot U_e \quad [\text{J}]$$

gdzie: Q – ładunek wyładowania [As], U_e – przyelektrodowy spadek napięcia [V].

Osiągnięcie temperatury stanowiącej próg topliwości metalu świadczy o zapoczątkowanej jego erozji. Temperatura topnienia jest różna dla różnych metali, zatem przepływ prądu wywołuje różne skutki w różnych metalach (wytapia się mniej lub więcej materiału –rys.1.).



Rys. 1. Otwór wypalony w blasze o grubości 0,05 cm

Do obliczeń objętości metalu wytopionego przez przepływający prąd piorunowy można wykorzystać zależność [1, 3]:

$$V = \frac{W}{\gamma} \cdot \frac{1}{c_w \cdot (\vartheta_s - \vartheta_u) + c_s} \quad [\text{m}^3]$$

gdzie:

W – energia [J],

γ – gęstość metalu [kg/m^3].

c_w – ciepło właściwe [J/kg·K],

c_s – ciepło topnienia [J/kg],

ϑ_s – temperatura topnienia [$^{\circ}\text{C}$],

ϑ_u – temperatura otoczenia [$^{\circ}\text{C}$].

Po wyznaczeniu objętości wytopionego metalu można wyznaczyć przybliżone wymiary otworów „wypalonych” w blachach o różnej grubości.

Dla uproszczenia można przyjąć, że wypalony otwór ma kształt walca i wykorzystać prosty wzór:

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot s$$

s – grubość blachy,

$d = 2r$ – średnica „wypalonego” otworu.

4. Ograniczanie przepięć w obwodach iskrobezpiecznych

W obwodach iskrobezpiecznych jakakolwiek iskra lub zjawiska cieplne nie mogą spowodować zapłonu w danej gazowej atmosferze wybuchowej. Urządzenia ograniczające przepięcia powinny w takich obwodach powinna charakteryzować odpowiednie wartości maksymalnego napięcia wejściowego (napięcie szczytowe prądu przemiennego lub prądu stałego) oraz maksymalnego prądu wejściowego (szczytowa wartość prądu przemiennego lub stałego), jakie można doprowadzić do jego zacisków bez utraty iskrobezpieczeństwa.

Dobierając urządzenia ograniczające przepięcia SPD (ang. Surge Protective Device) w obwodach iskrobezpiecznych należy uwzględnić przedstawione poniżej wymagania.

- W liniach dochodzących do obiektu ze stref zagrożonych wybuchem należy zastosować SPD przeznaczone do montażu w obwodach iskrobezpiecznych. Maksymalne wartości wejściowych napięć i prądów SPD powinny być większe od wartości dopuszczalnych dla innych urządzeń obwodu iskrobezpiecznego.
- Zastosowanie SPD nie powinno zmienić wytrzymałości izolacji pomiędzy obwodem iskrobezpiecznym a korpusem urządzenia lub jego częściami, które mogą być uziemione. Wytrzymałość izolacji obwodu iskrobezpiecznego do „ziemi”, do obudów urządzeń lub innych uziemionych elementów wchodzących w skład obwodu zwykle określa wartość skuteczna napięcia przemiennego, która może być równa podwojonej wartości napięcia w obwodzie iskrobezpiecznym lub wartości 500V (w zależności od tego, która wartość jest większa). W takim układach ograniczniki przepięć powinny również wytrzymać próby napięciowe względem ziemi na poziomie minimum 500 V a.c. Spełnienie tego warunku wymaga zastosowania dodatkowego odgromnika gazowanego pomiędzy wejściami przewodów sygnałowych a ziemią.
- Ograniczać przepięcia pomiędzy obwodem iskrobezpiecznym a nieiskrobezpiecznym do poziomu, co najmniej 1000V.
- Obwody iskrobezpieczne mogą osiągać znaczne długości, wychodzić na zewnątrz obiektów budowlanych lub przebiegać całkowicie poza nimi i dlatego należy także uwzględnić różny stopień zagrożenia przepięciowego przyłączy sygnałowych.
 - W liniach przesyłu sygnałów dochodzących do obiektu każda żyła powinna być zabezpieczona przed przepięciami przy pomocy układu SPD o wytrzymałości na działanie prądu udarowego o wartości szczytowej minimum 10 kA i kształcie 8/20.
 - W przypadku możliwości wystąpienia zagrożeń stwarzanych przez bezpośrednie oddziaływanie części prądu piorunowego na linie przesyłu sygnałów układy SPD powinny zapewnić ochronę przed prądami dochodzącymi do 2 kA i kształcie 10/350.
- Przepięcia pomiędzy przewodami obwodu iskrobezpiecznego powinny być ograniczone poniżej wytrzymałości udarowej. W przypadku braku informacji o poziomie odporności udarowej należy przepięcia ograniczyć do poziomów równych 3-4 krotności wartości sygnałów znamionowych.
- SPD instalowane w liniach dochodzących ze stref zagrożonych wybuchem powinny charakteryzować się małymi wartościami indukcyjności i pojemności. Po zainstalowaniu

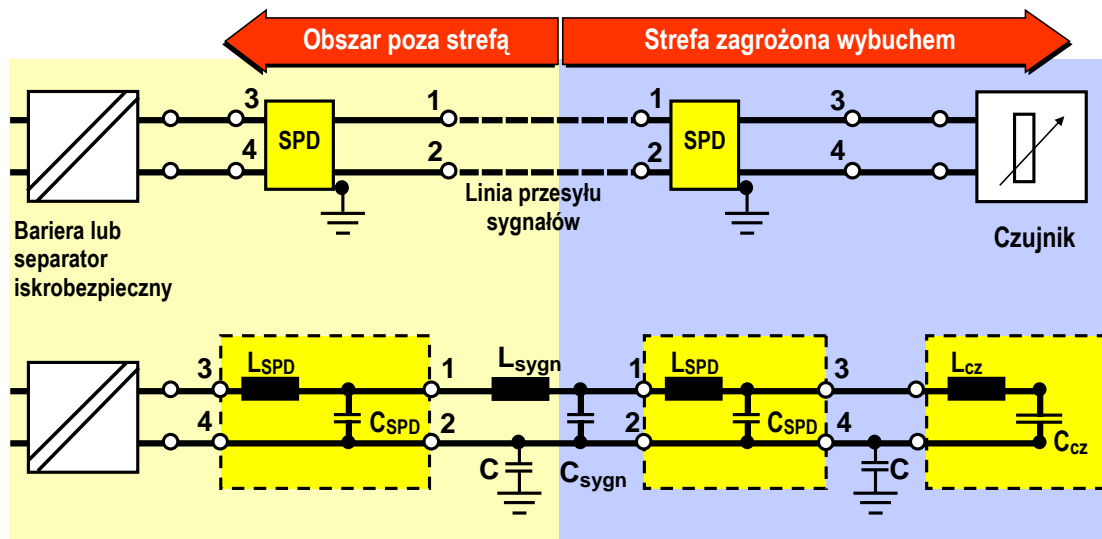
ograniczników wypadkowa pojemność i indukcyjność toru sygnałowego nie może przekraczać wymaganych wartości.

- Rozważenie ewentualnego miejsca montażu SPD: optymalne rozwiązanie - wprowadzanie kabli do obiektu; gorszy wariant - pierwsze szafy, do których dochodzą linie przesyłu sygnałów.
- W instalacji elektrycznej należy zastosować SPD typu 2 chroniące przed znamionowymi prądami udarowymi 15- 20 kA i kształcie 8/20. Jeśli zachodzi taka konieczność, układy SPD należy umieścić w szafkach posiadających odpowiednie dopuszczenia do montażu w strefach zagrożonych wybuchem. Tylko w przypadku możliwości oddziaływania na instalacje elektryczne części prądu piorunowego należy zastosować SPD typu 1.

W przypadku zastosowania urządzeń ograniczających przepięcia przed czujnikami lub przetwornikami należy dodatkowo spełnić następujące wymagania:

- Czujniki, elementy wykonawcze, przetworniki znajdujące się na zewnątrz obiektu w strefach zagrożonych wybuchem powinny być zabezpieczone przed przepięciami dochodzącymi z linii sygnałowych i instalacji zasilającej.
- Każda żyła toru sygnałowego oraz zasilającego powinna być zabezpieczona przed przepięciami przy pomocy SPD o wytrzymałości na działanie prądu udarowego o wartości szczytowej minimum 10 kA i kształcie 8/20.
- W instalacji elektrycznej dochodzącej do urządzeń pracujących w strefach zagrożonych wybuchem należy zastosować układy SPD typu 2 chroniące przed znamionowymi prądami udarowymi 10- 20 kA i kształcie 8/20 lub SPD typu 1 (tylko w przypadku zagrożenia bezpośrednim oddziaływaniem prądu piorunowego na instalację elektryczną).
- SPD należy umieścić w szafkach poza obszarem stref zagrożonych wybuchem lub w strefach w szafkach posiadających odpowiednie dopuszczenia do montażu w strefach zagrożonych wybuchem.

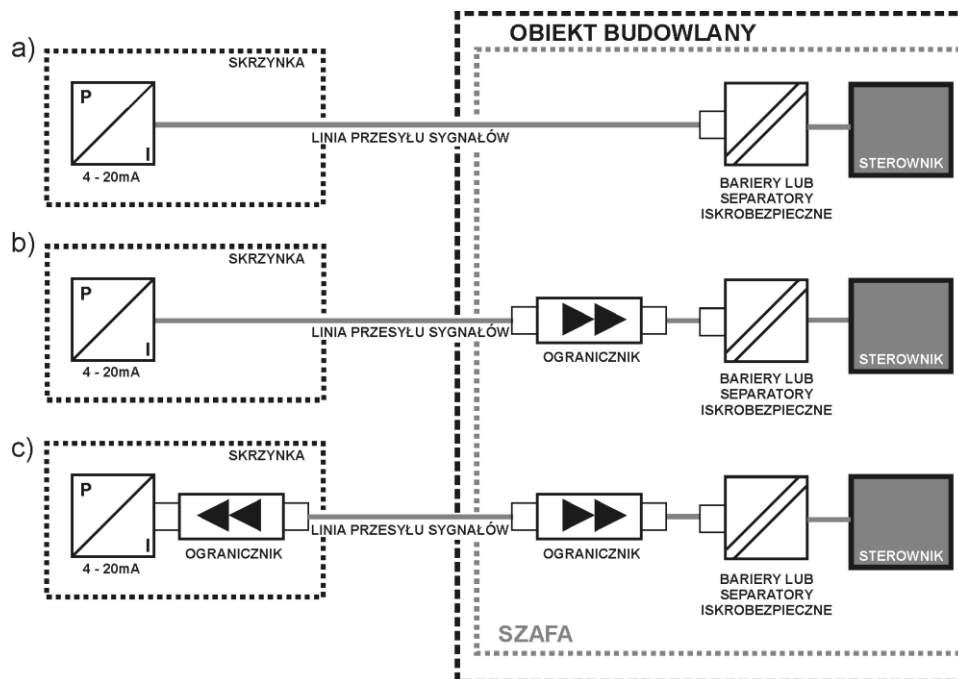
Dodatkowo należy określić wartości indukcyjności i pojemności w obwodzie iskrobezpiecznym po zamontowaniu ogranicznika (rys. 2.).



Rys. 2. Przykład rozmieszczenia urządzeń do ograniczania przepięć SPD w obwodzie iskrobezpiecznym oraz zastępczy obwód do określania indukcyjności i pojemności.

Wyznaczone wartości należy porównać z wartościami określającymi maksymalną indukcyjność i maksymalną pojemność, jakie mogą wystąpić w obwodzie bez utraty iskrobezpieczeństwa.

Typowy przykład iskrobezpiecznego obwodu pomiaru ciśnienia oraz różnorodnych rozwiązań połączeń SPD przeznaczonych do obwodów iskrobezpiecznych przedstawia rys. 3.



Rys. 3. Obwód pomiaru ciśnienia; a) niechroniony przed przepięciami, b) ochrona obejmuje tylko barierę/separator, c) ochrona dwustronna.

W przedstawionym układzie pomiarowym można ograniczać przepięcia dochodzące:

- tylko do urządzeń elektronicznych (np. sterowniki) pracujących w sterowni (rys. 3b),
- do przetworników pomiarowych i urządzeń pracujących w sterowni (rys. 3c).

W pierwszym przypadku (rys. 3b), zapewniono tylko bezpieczne działanie separatorów/barier oraz urządzeń sterujących. Niestety podczas bezpośredniego wyładowania piorunowego w obiekt, w którym jest sterownia, lub wyładowania w obszarze pracy przetworników pomiarowych mogą wystąpić różnice potencjałów lub indukowane przepięcia w kablu pomiarowym i uszkodzić przetwornik pomiarowy. Pełną ochronę przetwornika i bariery/separatora uzyskujemy stosując w obwodzie dwa SPD (rys. 3c).

5. Podsumowanie

Zapewnienie pewnej i skutecznej ochrony odgromowej obiektów budowlanych, w tym obiektów zagrożonych wybuchem w szczególności, wymaga podjęcia wieloetapowych działań, które powinny być realizowane przez specjalistę z dziedziny ochrony odgromowej posiadającego dodatkowo pogłębioną wiedzę z dziedziny kompatybilności elektromagnetycznej urządzeń, instalacji i systemów. Powinien on ściśle współpracować z inwestorem lub właścicielem budynku, z architektem, wykonawcą budynku, projektantami innych instalacji (elektrycznych, elektronicznych, informatycznych, telekomunikacyjnych) itp.

Współpraca i koordynacja działań wszystkich zainteresowanych stron w fazie projektowania, budowy i badania urządzeń piorunochronnych powinna obejmować w szczególności:

- konsultacje we wszystkich fazach konstruowania obiektu,
- ustalenie zakresów odpowiedzialności stron za zaistniałe podczas budowy nieprawidłowości,
- przestrzeganie procedur odbioru urządzenia,
- przestrzeganie procedur użytkowania i ew. przebudowy obiektu.

Uzgodnienia i konsultacje powinny być prowadzone z architektem, z zakładami użyteczności publicznej, ze służbami pożarnictwa i bezpieczeństwa, z instalatorami urządzeń elektronicznych i anten oraz z wykonawcami prac budowlanych i instalacyjnych.

Przedstawione informacje powinny pomóc w ocenie zagrożenia cieplnego, jakie wywołuje bezpośrednie wyładowanie piorunowe w przewodzące elementy (przewody lub pokrycia z blach) oraz przepływ prądu piorunowego. Taka ocena może być niezwykle istotna w przedstawionych poniżej następujących przypadkach.

1. Ocenie możliwości umieszczenia zwodów lub przewodów odprowadzających na ścianach wykonanych z materiału palnego. Taki sposób układania zaleca norma, jeśli temperatura przewodów przy przepływie prądu piorunowego nie przekroczy dopuszczalnej dla danego materiału.
2. Ocenie ewentualnych uszkodzeń, jakie wystąpią w naturalnych elementach przewodzących wykorzystywanych do odprowadzania prądu piorunowego (blachy pokrycia dachowego, elementy fasad itp.).
3. Ocenie zagrożeń wywołanych przez przepływ prądu piorunowego w połączeniach wyrównawczych.
4. Analizie zagrożenia stwarzanego przez prąd piorunowy podczas bezpośrednich wyładowań piorunowych w urządzenia technologiczne poza budynkami (np. zbiorniki, rurociągi, aparaty wyposażone w zawory, kominki, złącza).

Taka ocena może być niezwykle istotna przy projektowaniu różnorodnych rozwiązań ochrony odgromowej w strefach zagrożonych pożarem lub wybuchem.

Literatura

1. Flisowski Zd.: Trendy rozwojowe ochrony odgromowej budowli. Część 1. Wyładowania piorunowe jako źródło zagrożenia. PWN 1986.
2. Hampe E.A., Trommer W.: Blitzschutzanlagen. Planen, Bauen, Prüfen. Huthing 1997.
3. Hasse P., Wiesinger J.: Handbuch für Blitzschutz und Erdung. VDE-Vetlag, Berlin.
4. Noack F., Schönau J., Aumeier W., Trinkwald H.: Blitzstromtragfähigkeit von Verbindungsbauteilung für Blitzschutzanlagen. Der Blitzschutz in der Praxis, 1999
5. Sowa A.: Kompleksowa ochrona odgromowa i przepięciowa. Warszawa 2005.
6. PN-EN 61643-11:2003(U), Niskonapięciowe urządzenia ograniczające przepięcia – Część 11: Urządzenie do ograniczania przepięć w sieciach rozdzielczych niskiego napięcia. Wymagania i próby.
7. PN-EN 50014:2004, Urządzenia elektryczne w przestrzeniach zagrożonych wybuchem. Wymagania ogólne.
8. PN-EN 1127-1:2001, Atmosfery wybuchowe i ochrona przed wybuchem. Pojęcia podstawowe i metodologia. .
9. PN-EN 60079-25:2004(U), Urządzenia elektryczne w przestrzeniach zagrożonych wybuchem. Część 25. Systemy iskrobezpieczne.
10. NAMUR NE 21. Elektromagnetische Vertraglichkeit von Betriebsmitteln der Process- und Labortechnik.
11. PN-EN 50020. Urządzenia elektryczne w przestrzeniach zagrożonych wybuchem. Wykonanie iskrobezpieczne „i”. Grudzień 2000.