

Szymon Ptak
Albert Smalcerz
Piotr Ostrowski

**ZAPŁON ATMOSFER
WYBUCHOWYCH
WYWOŁYWANY
PRZEZ NIEZUPEŁNE
WYŁADOWANIA
ELEKTROSTATYCZNE**

OCENA RYZYKA
I METODY
ZAPOBIEGANIA

Materiały informacyjne CIOP-PIB

Zapłon atmosfer wybuchowych wywołany przez niezupełne wyładowania elektrostatyczne. Ocena ryzyka i metody zapobiegania

Opracowano na podstawie wyników IV etapu programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy” sfinansowanego w latach 2017-2019 w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego/Narodowego Centrum Badań i Rozwoju.

Koordinator Programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.

Projekt III.N.08: Badanie energii i mocy strimerów powstających w czasie niezupełnych wyładowań elektrostatycznych (ESD)

Autorzy:

dr inż. Szymon Ptak, dr hab. inż. Albert Smalcerz, dr inż. Piotr Ostrowski – Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy, Zakład Bioelektromagnetyzmu, Pracownia Zagrożeń Elektrostatycznych

Zdjęcie na okładce: AdobeStock/Misha

© Copyright by
Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy
Warszawa 2019

CIOP  **PIB**

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Czerniakowska 16, 00-701 Warszawa
tel. (48-22) 623 36 98, www.ciop.pl

1. Rodzaje wyładowań elektrostatycznych

Wyładowanie elektrostatyczne (ESD, ang. *electrostatic discharge*) jest gwałtownym i szybkim rozładowaniem skumulowanego, nadmiarowego ładunku elektrycznego przez przepływ impulsu prądowego między obiektami o różnych potencjałach. Czas ESD jest krótki i wynosi od kilku nanosekund do kilkuset mikrosekund. Wynika to z niewielkich wartości ładunków elektrostatycznych dostępnych lokalnie. Krótkotrwałe kanały plazmowe o temperaturze od ok. tysiąca do kilkunastu tysięcy stopni Celsjusza mogą powodować zapłon atmosfery wybuchowej. Wywołuje ona poważne zakłócenia w procesie produkcji i w sferze użytkowania wyrobów oraz stanowi przyczynę stosunkowo licznych zdarzeń wypadkowych. Wyładowania, rozumiane jako przepływ ładunków elektrycznych, są także źródłem fal elektromagnetycznych, które mogą zakłócać pracę układów elektronicznych i uszkadzać elementy półprzewodnikowe. Ludzie odczuwają je jako przykre, czasami bolesne rażenie. Większość tych zjawisk jest szkodliwa lub niebezpieczna, dlatego muszą być brane pod uwagę przy zarządzaniu bezpieczeństwem pracy.

Podstawowy podział wyładowań elektrostatycznych samoistnych wynika z liczby elektrod:

- jednoelektrodowe,
- dwuelektrodowe.

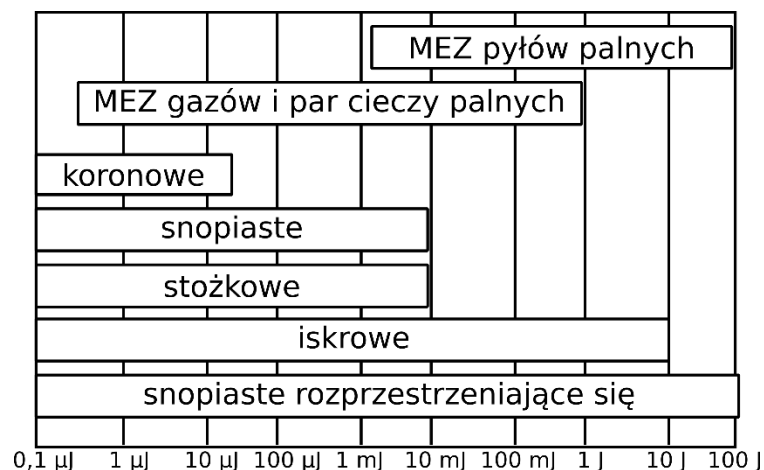
W grupie wyładowań jednoelektrodowych możemy wyróżnić (Smalcerz, Ptak, Ostrowski 2019; Grabarczyk, Kurczewska 2008):

- Koronowe (ulotowe) – ang. *corona discharge*, występujące pomiędzy przewodzącym ostrym punktem lub krawędzią (średnica krzywizny powierzchni jest mniejsza niż 5 mm) a drugim obiektem przewodzącym lub naelektryzowanym dielektrykiem (stałym lub ciekłym). Pomiedzy obiektami musi występować różnica potencjałów co najmniej kilka kilowoltów.
- Snopiaste – ang. *brush discharge*, istnieją dwa warianty: między dwoma przewodzącymi obiektami o różnym potencjale lub obiektem przewodzącym i naelektryzowanym dielektrykiem (stałym lub ciekłym) o różnicy potencjałów wynoszącej co najmniej kilka kilowoltów. Średnica krzywizny mniejszej elektrody powinna mieścić się w zakresie od 5 do 50 mm.
- Stożkowe (Maurera) – ang. *cone discharge*, występuje wzdłuż powierzchni stożka luźnych materiałów znajdujących się w silosie lub w dużym pojemniku.

Natomiast w grupie wyładowań dwuelektrodowych wyróżnia się (Lutgens 1997):

- Iskrowe – ang. *capacitive spark discharge*, występujące tylko między przewodzącymi obiektami (w tym ludzkim ciałem), przy czym różnica potencjałów musi być wyższa niż 330 V.
- Snopiaste rozprzestrzeniające się (Lichtenberga) – ang. *propagating brush discharge* (PBD), przebiega z powierzchni naelektryzowanego dielektryka, pokrywającego materiał przewodzący, do drugiego zbliżającego się obiektu przewodzącego lub wnika w głąb obustronnie naładowanego dielektryka. Warunkiem powstania tego typu wyładowania jest duża gęstość powierzchniowa ładunku (min. $0,25 \text{ C/m}^2$) oraz niewielka grubość materiału dielektrycznego (poniżej 10 mm) i wytrzymałość dielektryczna wyższa niż 4 kV/m (Smalcerz, Ptak, Ostrowski 2019; Grabarczyk, Kurczewska 2008; Lutgens 1997, Cross 1987).

W kontekście bezpieczeństwa procesowego najważniejszy parametr to energia uwalniana podczas ESD, ponieważ jest ona bezpośrednio związana z minimalną energią zapłonu (MEZ) mieszaniny wybuchowej, zwykle par cieczy palnej, pyłu lub gazu z powietrzem atmosferycznym. Diagram ilustrujący zależność między typowymi wartościami energii wyładowań danego rodzaju a typowymi wartościami MEZ mieszanin substancji palnych z powietrzem przedstawiono na rysunku 1.

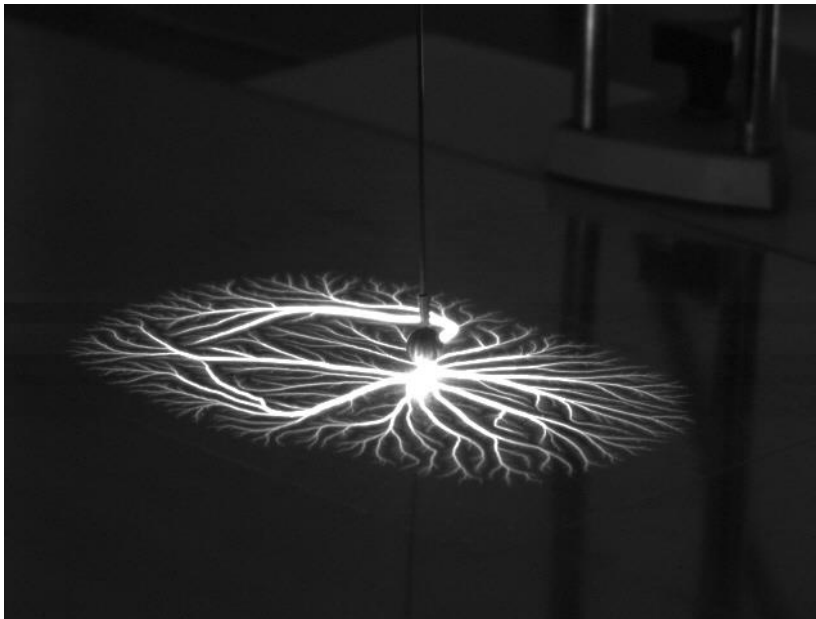


Rysunek 1. Porównanie energii wyładowań elektrostatycznych z MEZ (Kowalski 2015)

Jak widać na diagramie (rys. 1), każdego typu wyładowanie stanowi potencjalne źródło zapłonu dla mieszanin gazów i par cieczy palnych z powietrzem. Natomiast energia dla wyładowań iskrowych

i snopiastych rozprzestrzeniających się osiąga wartości, które mogą umożliwić zapłon mieszanin pyłów palnych z powietrzem. Ocena zagrożenia zapłonu pyłów palnych w przypadku wyładowań snopiastych i stożkowych jest niejednoznaczna. Dlatego też podjęto próbę opracowania metody oceny ryzyka zapłonu atmosfer wybuchowych przez niezupełne ESD z naelektryzowanych dielektryków. Wyładowania snopiaste rozprzestrzeniające się (Lichtenberga) – ang. *propagating brush discharge* (PBD) – przebiegają z powierzchni naelektryzowanego dielektryka, pokrywanego materiałem przewodzący, do drugiego zbliżającego się obiektu przewodzącego lub wnikają w głąb obustronnie naładowanego dielektryka. Tego typu wyładowania są przedmiotem niniejszego poradnika, ponieważ najczęściej powstają one w przemyśle, a wiedza na ich temat jest ograniczona. Niejednokrotnie będzie trudne także ograniczenie związanych z nimi zagrożeń.

Wyładowanie tego typu, uzyskane w warunkach laboratoryjnych, przedstawiono na rysunku 2.



Rysunek 2. Obraz wyładowania snopiastego rozprzestrzeniającego się. Źródło: opracowanie własne

Do wyładowania przedstawionego na rysunku 2 doszło na powierzchni dielektryka o grubości 0,1 mm podczas zbliżania do niego uziemionej kuli stalowej. Powierzchnia dielektryka była ładowana strumieniem aerojonów wygenerowanych w polu elektrycznym elektrody ostrzowej, kierowanym na jego powierzchnię, co jest równoważne jonizacji w warunkach pracy.

Należy zaznaczyć, że materiał, na którego powierzchni obserwuje się takie wyładowanie, jest nieprzewodzący, co znaczy, że ruch ładunków elektrycznych po powierzchni, a także w objętości, jest utrudniony. W trakcie wyładowania następuje silna jonizacja powietrza, a wytworzone kanały plazmowe tworzą charakterystyczną strukturę widoczną na fotografii. Można także zauważyć, że pewne obszary dielektryka nie zostają objęte zasięgiem wyładowania, a to oznacza, że niecały ładunek elektryczny ulega neutralizacji.

Na rysunku 2 przedstawiono wyładowanie, które obejmuje swoim zasięgiem obszar ok. 180 x 250 mm. Można zatem wywnioskować, że uwolniona do otoczenia energia będzie znaczna.

2. Warunki powstawania

Istnieje wiele warunków koniecznych do powstania niezupełnego wyładowania elektrostatycznego. Najważniejsze z nich to:

- 1) Gęstość powierzchniowa ładunku – jej wartość zależy od szeregu czynników. Jeżeli dielektryk, np. powłoka nieprzewodząca metalowego rurociągu, narażony będzie na oddziaływanie zewnętrznego zmiennego pola elektromagnetycznego, prądami indukcji, na zewnętrznej powierzchni materiału będzie się gromadził ładunek elektrostatyczny. Następuje to wówczas, kiedy podłoże, tutaj: rurociąg, jest skutecznie uziemione. Każdy rodzaj materiału cechuje określona zdolność do gromadzenia ładunku na powierzchni. Jednocześnie zdolność ta maleje wraz ze wzrostem grubości. Przyjmuje się, że minimalna wartość ładunku elektrycznego konieczna do powstania wyładowania snopiastego rozprzestrzeniającego się wynosi ok. 0,25 C/m².
- 2) Grubość warstwy dielektryka – im większa, tym mniejsza ilość ładunku elektrycznego będzie gromadzić się na powierzchni materiału. Występuje tu pewna analogia do kondensatora. Otóż materiały nieprzewodzące charakteryzuje mała przenikalność elektryczna. Zewnętrzna powierzchnia dielektryka, na której powstawać będą ładunki, tworzy zatem koncepcyjnie jedną z okładek kondensatora, przy czym druga okładka to uziemiony przewodzący element. Wraz ze zwiększeniem grubości dielektryka rośnie zatem fizyczna bariera między „okładkami”. Przyjmuje się, że dla grubości dielektryka powyżej 10 mm wyładowanie snopiaste rozprzestrzeniające się nie będzie już występować.

- 3) Wytrzymałość dielektryczna materiału – jeżeli dana powłoka będzie miała zbyt małą wytrzymałość dielektryczną, rosnący potencjał na jej powierzchni doprowadzi do przebicia, czyli fizycznego zniszczenia materiału przez przepływ ładunku (do uziemionego, metalowego rurociągu). Przyjmuje się, że, aby osiągnąć podane kryterium minimalnej gęstości powierzchniowej ładunku, konieczna jest wytrzymałość dielektryczna powłoki rzędu 4 kV/m.

W warunkach przemysłowych można wyróżnić dwie typowe sytuacje, w których z powierzchni dielektryka będzie mogło nastąpić wyładowanie snopiaste rozprzestrzeniające się:

- powierzchnia dielektryka (np. powłoki uziemionego przewodzącego rurociągu) naelektryzuje się do takiego poziomu, że nastąpi przebicie i przepływ ładunku do uziemienia;
- do naelektryzowanej powierzchni dielektryka zbliży się obiekt przewodzący skutecznie uziemiony. Sytuacja tego typu została przedstawiona na rysunku 1. Wyładowanie wymuszano przez zbliżenie do powierzchni dielektryka uziemionej kuli stalowej o określonym promieniu krzywizny.

Przykładowe sytuacje, w których może dojść do wyładowania snopiastego rozprzestrzeniającego się, zestawiono poniżej:

1) Transport pneumatyczny materiałów nieprzewodzących

Udokumentowano zdarzenie, w którym pracownik opróżniał cysternę kolejową, przewożącą kryształy kwasu adypinowego, czyli rozdrobnionego ciała stałego o małej konduktywności. Proces odbywał się z wykorzystaniem rury przewodzącej (aluminiowej), którą wprowadzano do cysterny przez otwór rewizyjny. Wytworzone podciśnienie umożliwiało odpompowanie medium i przeładunek do zbiorników elastycznych FIBC („big bagów”) po stronie wylotowej filtra cyklonowego. Tak prowadzony proces był bezpieczny. Z pewnych względów wprowadzono jednak modyfikację polegającą na zastąpieniu rury aluminiowej rurą wykonaną z PCV, czyli nieprzewodzącego tworzywa sztucznego. Wytwarzający się na skutek tarcia ładunek elektrostatyczny nie spływał zatem do uziemienia, jak przy zastosowaniu uziemionej rury aluminiowej, co doprowadziło do powstania wyładowania snopiastego rozprzestrzeniającego się i zapalenia medium (Egan 2017).

2) Powłoki stosowane w pojemnikach typu FIBC („big bag”)

Jak wykazano, ryzyko wyładowania na powierzchni pojemników typu FIBC jest istotne. Dotyczy to sytuacji, w których wewnętrzną powierzchnię zbiorników stanowią nieprzewodzące powłoki o odpowiedniej grubości, rzędu co najmniej 0,15 mm. Przy cieńszych powłokach bowiem prędzej nastąpi przebicie materiału niż napięcie mierzone na powierzchni będzie wystarczająco wysokie, aby mogło powstać wyładowanie snopiaste rozprzestrzeniające się.

3. Energia wyładowania

Jak wynika z badań laboratoryjnych, wydzielona energia zależy od:

- grubości materiału dielektryka,
- napięcia (wynikającego z gęstości ładunku) na powierzchni,
- polaryzacji napięcia na powierzchni,
- zasięgu wyładowania.

Dla każdej próbki o danej geometrii istnieje pewna graniczna gęstość powierzchniowa ładunku, której mimo zmiennych warunków ładowania nie da się przekroczyć. Po jej osiągnięciu także zasięg wyładowania będzie zależny od gęstości powierzchniowej ładunku. Tak więc jeżeli znamy napięcie elektrostatyczne dielektryka i jeżeli pozostałe parametry, opisane wcześniej, są spełnione, możemy oszacować maksymalną energię wyładowania snopiastego rozprzestrzeniającego się.

Przykładowe wyniki zestawiono w tabeli poniżej (tab. 1). Dotyczą one próbki folii PCV o grubości 0,2 mm umieszczonej na przewodzącym, uziemionym podłożu. Próbka była ładowana przez aerjony ukierunkowane polem elektrycznym wokół elektrody ostrzowej, do której przykładano napięcie +/- 50 kV.

Tabela 1. Typowe wartości energii niezupełnego ESD dla próbki folii PCV o grubości 0,2 mm

Pole powierzchni próbki, cm ²	Napięcie elektrostatyczne na powierzchni próbki przed wyładowaniem, kV	Napięcie elektrostatyczne na powierzchni próbki po wyładowaniu, kV	Maksymalna energia dostępna na powierzchni próbki, mJ	Czas trwania wyładowania, μ s	Maksymalna energia wyładowania, mJ
1 247	13	4,86	183,2	1,36	123
	-14,1	-4,14	273,9	1,50	188
624	13,4	3,41	276,3	1,02	229
	-13,6	-3,42	284,8	1,02	234
311	7,2	2,86	52,1	0,94	45
	-6,9	-2,48	54,2	1,02	44
155	4,12	2,3	9,14	0,84	8
	-3,72	-1,64	11,94	0,83	11

4. Wybuchowość gazów, par cieczy palnych i pyłów

Przebieg procesu wybuchu materiału palnego w postaci pyłu wygląda następująco:

- materiał jest ogrzany, a ciepło prowadzi do rozkładu termicznego cząstek pyłu,
- proces rozkładu termicznego powoduje wydzielanie łatwopalnych gazów uwalniających się z ciała stałego,
- produkty rozkładu termicznego mieszają się w atmosferze z tlenem,
- zapłon i wybuch następuje w fazie gazowej.

Dla materiałów organicznych wszelkie efekty bezpośredniego utleniania powierzchni są uważane za małe, niemal równe zeru, choć w poprzednich latach niektórzy badacze twierdzili odwrotnie – pyły mogły ulegać zapłonowi głównie przez utlenianie powierzchni. Istnieje jeszcze jeden mechanizm związany z materiałami wybuchowymi, jednak będzie on pominięty, gdyż niniejszy poradnik nie dotyczy tego zagadnienia.

Spalanie obłoków pyłu różni się od spalania mieszanin gazowych. W obłokach pyłu w wyniku dyskretnej natury cząstek każda z osobna tworzy jakby lokalną strefę spalania. W przypadku eksplozji strefy te znajdują się odpowiednio blisko siebie, co zostało nazwane „mechanizmem współpracy”, który podtrzymuje spalanie. Ponadto chmury pyłu, w przeciwieństwie do łatwopalnych gazów, są

rzadko tworzone bez turbulencji. To powoduje, że grubość płomienia wybuchu chmury pyłu jest rzędu centymetrów, a nie 1 mm, jak w przypadku płomienia gazu.

Niemniej jednak do powstania wybuchu obłoku pyłu niezbędne jest pięć czynników. Określa się je „pięciokątem wybuchowości”, który przedstawiono na rysunku 3.



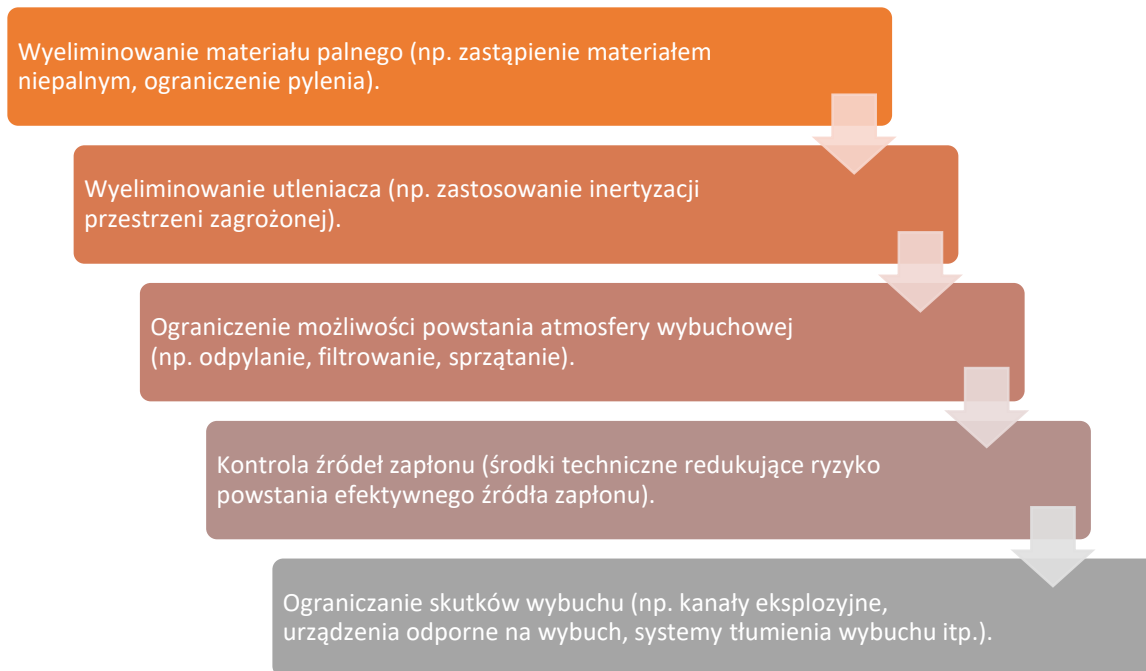
Rysunek 3. Pięciokąt wybuchowości. Źródło: S. Ptak, M. Półka, *Wpływ biomasy na parametry palności i wybuchowości pyłu węgla kamiennego*, SGSP, Warszawa 2018

Przeciwdziałanie wybuchowi będzie zatem związane z wykluczeniem kolejnych czynników (usuwaniem poszczególnych elementów pięciokąta):

- usunięcie paliwa lub zastąpienie go innym nie zawsze będzie możliwe. Wybuch zależy jednak także od rozdrobnienia substancji palnej. Mniejsze frakcje pyłu będą się zatem wiązały z intensywniejszym wybuchem;
- utleniacz – wraz ze spadkiem zawartości tlenu zapłon substancji jest coraz mniej możliwy, co się wiąże z coraz mniejszym zagrożeniem;
- mieszanie – szczególnie ważne w przypadku mieszanin pyłowo-powietrznych, wpływa na formowanie atmosfery wybuchowej w określonych warunkach, np. przy określonych stężeniach materiału palnego w otoczeniu;
- źródło zapłonu – ograniczenie jego wystąpienia wpływa na zmniejszenie możliwości zapłonu mieszaniny wybuchowej, która jest obecna w danym otoczeniu;
- ograniczenie przestrzeni – powoduje narastanie ciśnienia wybuchu, a zatem umożliwia jego rozprzestrzenianie, jak również rozrzedzanie atmosfery wybuchowej.

5. Koncepcja zabezpieczenia przed wybuchem

Z punktu widzenia pracodawcy działania w kierunku zapewnienia minimalnego akceptowalnego poziomu bezpieczeństwa w kontekście zagrożenia wybuchem, zgodnie z opisaną w dyrektywie ATEX metodyką, zawsze będą się sprowadzać do określonej sekwencji następujących po sobie czynności (rys. 4).



Rysunek 4. Koncepcja stosowania zintegrowanych zasad bezpieczeństwa. Źródło: opracowanie własne na podstawie dyrektywy 2014/34/EU (ATEX)

W ogólnym rozumieniu najważniejsze jest przeciwdziałanie powstawaniu atmosfery wybuchowej, co zgodnie z koncepcją „pięciokąta wybuchowości” zakłada eliminowanie materiału palnego, utleniacza i możliwości ich mieszania się. Tak więc pierwszym krokiem zawsze będzie **wpływanie na możliwość powstawania atmosfery wybuchowej**.

Ponieważ prawdopodobieństwo powstawania atmosfery wybuchowej nigdy nie będzie równe zero, konieczne jest wpływanie na możliwość występowania efektywnych źródeł zapłonu, które wydzielają energię wyższą niż MEZ danej mieszaniny wybuchowej. W normie PN-EN 1127-1:2019 Atmosfery wybuchowe – Zapobieganie wybuchowi i ochrona przed wybuchem – Część 1: Pojęcia podstawowe i metodyka wymieniono 13 możliwych źródeł zapłonu:

- Gorące powierzchnie.
- Płomienie i gorące gazy oraz cząsteczki.
- Iskry generowane mechanicznie.
- Urządzenia elektryczne.
- Prądy błędzące i katodowa ochrona przed korozją.
- Wyładowania elektrostatyczne.
- Wyładowania atmosferyczne.
- Fale o częstotliwości radiowej od 10^4 Hz do $3 \cdot 10^{11}$ Hz.
- Fale elektromagnetyczne o częstotliwości od $3 \cdot 10^{11}$ Hz do $3 \cdot 10^{15}$ Hz.
- Promieniowanie jonizujące.
- Ultradźwięki.
- Adiabatyczne sprężanie i fale ciśnienia.
- Reakcje egzotermiczne, w tym samozapalenie pyłów.

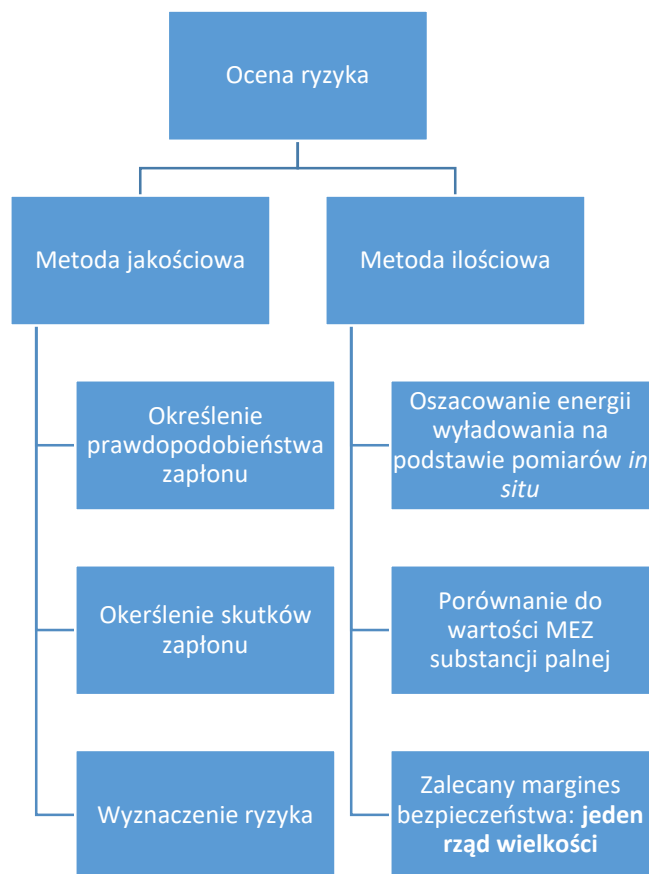
Kolejnym krokiem wynikającym ze zintegrowanych zasad bezpieczeństwa (rys. 4) jest ograniczenie skutków wybuchu, czyli ostateczny poziom oddziaływania na bezpieczeństwo procesowe, który z definicji zakłada pewne straty. Stosuje się różnego rodzaju rozwiązania, np.:

- Urządzenia odporne na wybuch.
- Kanały eksplozyjne (diwertery).
- Urządzenia odciążające wybuch.
- Urządzenia bezpłomieniowego odciążania wybuchu.
- Systemy izolowania wybuchu.
- Systemy tłumienia wybuchu (np. system HRD).

6. Koncepcja oceny ryzyka zapłonu atmosfer wybuchowych wskutek niezupełnych ESD

1.1. Wprowadzenie

Na poniższym diagramie (rys. 5) zestawiono dwie proponowane metody szacowania ryzyka zapłonu mieszanin wybuchowych na skutek powstałych wyładowań elektrostatycznych niezupełnych (snopiastych rozprzestrzeniających się). Pierwsza z nich jest jakościowa i bazuje na wielu parametrach danego procesu technologicznego. Druga jest ilościowa i polega na oszacowaniu energii wyładowania na podstawie zmierzonego napięcia powierzchni nieprzewodzącej i porównaniu z wartością MEZ mieszaniny palnej, która jest obecna na danym stanowisku pracy czy też w danym procesie technologicznym.



Rysunek 5. Koncepcja oceny ryzyka zapłonu mieszaniny wybuchowej. Źródło: opracowanie własne

6.2. Metoda jakościowa oceny ryzyka

6.2.1. Miara ryzyka

Wyróżnia się dwa rodzaje analizy ryzyka. Pierwszym są metody ilościowe oparte na dyskretnych wartościach liczbowych lub rozkładach prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia czy też wystąpienia określonych skutków. Do wyznaczenia ostatecznej wartości ryzyka stosuje się metody matematyczne.

Drugi rodzaj stanowią jakościowe metody oceny ryzyka. Metody te stosuje się w sytuacjach, w których nie jest możliwe określenie konkretnych wartości prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia czy oszacowania strat. Stosuje się wówczas skale porównawcze, opracowane na podstawie zdarzeń historycznych czy metod eksperckich szacowania ryzyka.

Na pewnym poziomie ogólności, niezależnie od rodzaju analizy (jakościowej czy ilościowej), przyjmuje się definicję ryzyka R jako iloczyn prawdopodobieństwa P i skutków S :

$$R = P \times S$$

Zwyczajowo, w skalach ilościowych, w rozumieniu probabilistycznym, ryzyko przyjmuje wartości od 0 do 1, gdzie 0 oznacza zdarzenie niemożliwe, a 1 – zdarzenie pewne.

W analizie jakościowej stosuje się szacowanie prawdopodobieństwa i skutków wg zdefiniowanych kryteriów, a następnie korzysta z matrycy ryzyka, która określa odpowiedź końcową w postaci poziomu ryzyka, np. akceptowalnego, tolerowalnego i nieakceptowalnego.

W kontekście niniejszego poradnika zastosowana zostanie jakościowa ocena ryzyka wybuchu związanego z wystąpieniem niezupełnego ESD, przy czym szacowanie prawdopodobieństwa odbywać się będzie na podstawie pewnych ilościowych wskaźników podanych w tabeli 2.

Tabela 2. Ilościowe wskaźniki szacowania prawdopodobieństwa wystąpienia niezupełnego ESD

Określenie częstości zdarzenia	Częstość wskazana (na rok)	Częstość w odniesieniu do konkretnego urządzenia	Ogólna częstość występowania ¹
Częste	$> 10^{-1}$	może występować często	Strefa 0, 20
Prawdopodobne	$10^{-1} \div 10^{-2}$	wystąpi kilkakrotnie w okresie użytkowania	Strefa 1, 21
Sporadyczne	$10^{-2} \div 10^{-4}$	może czasem występować w okresie użytkowania	Strefa 1, 21
Rzadkie	$10^{-6} \div 10^{-6}$	mało prawdopodobne, ale możliwe wystąpienie w okresie użytkowania	Strefa 2, 22
Wyjątkowe	$< 10^{-6}$	tak mało prawdopodobne, że można założyć jego niewystąpienie w okresie użytkowania	Strefa 2, 22

Analiza skutków wystąpienia niezupełnego ESD odbywać się będzie na podstawie danych z tabeli 3.

Tabela 3. Klasyfikacja skutków wystąpienia niezupełnego ESD

Istotność skutków zdarzenia	Opis skutku
Katastroficzne	śmierć osoby lub całkowite zniszczenie instalacji
Ciężkie	poważne obrażenia, poważne choroby zawodowe lub znaczne zniszczenie instalacji
Poważne	drobne obrażenia lub choroby zawodowe, niewielkie zniszczenia instalacji
Lekkie	minimalne obrażenia, choroby zawodowe lub uszkodzenia instalacji

Wynik analizy ryzyka będzie wskaźnikiem, którego ostateczną interpretację opisano poniżej:

- A – sytuacja niepożądana, wysokie ryzyko wybuchu;
- B – ryzyko przejściowe, wymagające natychmiastowej interwencji na poziomie technicznym i organizacyjnym;
- C – ryzyko poziomu pośredniego, często środki organizacyjne są wystarczające;
- D – ryzyko niskie, akceptowalne.

¹ Dotyczy stref zagrożenia wybuchem, określonych w normie PN-EN 1127.

6.2.2. Prawdopodobieństwo zapłonu

Ocena prawdopodobieństwa zapłonu będzie zawsze dotyczyła czterech obszarów, co wiąże się z koncepcją „pięciokąta wybuchowości” (rys. 3). Zakłada się, że ocena jest przeprowadzana dla zamkniętej przestrzeni, więc wystąpienie piątego czynnika (ograniczenie przestrzeni) przyjmuje się jako pewne.

Tabela 4. Określenie częstości zdarzenia na podstawie parametrów procesu

Sytuacja	Określenie częstości zdarzenia P_1
W miejscu przewidywanego wystąpienia wyładowania	
– zawsze lub często znajduje się materiał palny (strefa zagrożenia wybuchem 0, 1 lub 20, 21) – brakuje wentylacji stanowiskowej – minimalna energia zapłonu mieszaniny wybuchowej jest mniejsza niż 10 mJ	częste (7)
– w warunkach normalnej eksploatacji może powstać atmosfera wybuchowa (strefa 2 lub 22) – brakuje wentylacji stanowiskowej – minimalna energia zapłonu mieszaniny wybuchowej jest niższa niż 100 mJ	prawdopodobne (5)
– w warunkach normalnej eksploatacji może pojawić się atmosfera wybuchowa (strefa 2 lub 22) – występuje wentylacja stanowiskowa (w wykonaniu zwykłym) o ograniczonej skuteczności – minimalna energia zapłonu mieszaniny wybuchowej jest niższa niż 100 mJ	sporadyczne (3)
– nie można wykluczyć powstania atmosfery wybuchowej – występuje wentylacja stanowiskowa (w wykonaniu zwykłym) o wydajności wpływającej na ograniczanie zasięgu przewidywanej atmosfery wybuchowej lub wentylacja awaryjna uruchamiana w momencie wykrycia substancji palnej – minimalna energia zapłonu mieszaniny wybuchowej jest niższa niż 100 mJ	rzadkie (2)
– nie można wykluczyć powstania atmosfery wybuchowej – występuje wentylacja stanowiskowa (w wykonaniu przeciwwybuchowym) o wydajności wpływającej na ograniczanie zasięgu przewidywanej atmosfery wybuchowej lub wentylacja awaryjna uruchamiana w momencie wykrycia substancji palnej – minimalna energia zapłonu mieszaniny wybuchowej jest niższa niż 1000 mJ	wyjatkowe (1)

Tabela 5. Określenie częstości zdarzenia na podstawie dostępności utleniacza

Sytuacja	Określenie częstości zdarzenia P_2
W miejscu przewidywanego wystąpienia wyładowania	
– znacznie podnosi się stężenie tlenu (> 23% obj.) lub – dostępne są środki chemiczne, które mogą stanowić źródło tlenu	częste (7)
– zwiększa się stężenie tlenu (> 21% obj.)	prawdopodobne (5)
– obniża się stężenie tlenu (< 21% obj.)	sporadyczne (3)
– występuje niskie stężenie tlenu (< 19% obj.)	rzadkie (2)
– występuje bardzo niskie stężenie tlenu (< 17% obj.)	wyjatkowe (1)

Tabela 6. Określenie częstości zdarzenia na podstawie warunków mieszania paliwa z utleniaczem

Sytuacja	Określenie częstości zdarzenia P_3
W miejscu przewidywanego wystąpienia wyładowania	
– materiał palny w sposób swobodny i niezaburzony (np. pracującą wentylacją) miesza się z powietrzem	częste (7)
– znajduje się wentylacja wpływająca na rozprzestrzenianie się materiału palnego	prawdopodobne (5)
– znajduje się wentylacja skutecznie rozrzedzająca atmosferę wybuchową do poziomu poniżej dolnej granicy wybuchowości – stosuje się procedury niedopuszczające do gromadzenia się warstw osiadłego pyłu	sporadyczne (3)
– znajduje się wentylacja skutecznie rozrzedzająca atmosferę wybuchową do poziomu poniżej dolnej granicy wybuchowości – stosuje się procedury niedopuszczające do gromadzenia się warstw osiadłego pyłu – zapewnia się procedury kontroli sprzętu ograniczające ryzyko powstania emisji, np. kwartalne próby ciśnieniowe instalacji gazowej, procedury bezpiecznego transportu pojemników z cieczą palną, regularne kontrole i konserwacje instalacji odpylania itp.	rzadkie (2)
– zawsze udostępnia się wentylację skutecznie rozrzedzającą atmosferę wybuchową do poziomu poniżej dolnej granicy wybuchowości – stosuje się system odpylania niedopuszczający do powstawania mieszaniny wybuchowej pyłowo-powietrznej i osiadłych warstw pyłu – stosuje się procedury zapewniające pewność działania instalacji technicznych i wykrywanie awarii z wyprzedzeniem	wyjatkowe (1)

Tabela 7. Określenie częstości zdarzenia na podstawie charakterystyki źródła zapłonu

Sytuacja	Określenie częstości zdarzenia P_4
Wykorzystywane są cienkie warstwy dielektryka o grubości poniżej 1 mm, wytrzymałości dielektrycznej poniżej 4 kV/m, występuje skuteczne źródło ładunku elektrostatycznego (np. obecność zmiennego pola elektromagnetycznego, fizyczne rozdzielanie ładunku, jonizacja przez strumień aerojonów) powodujące naładowanie powierzchni dielektryka do napięcia elektrostatycznego > 5 kV	częste (7)
Wykorzystywane są cienkie warstwy dielektryka o grubości poniżej 1 mm, wytrzymałości dielektrycznej poniżej 4 kV/m, występuje skuteczne źródło ładunku elektrostatycznego (np. obecność zmiennego pola elektromagnetycznego, fizyczne rozdzielanie ładunku, jonizacja przez strumień aerojonów) powodujące naładowanie powierzchni dielektryka do napięcia elektrostatycznego > 4 kV	prawdopodobne (5)
Wykorzystywane są cienkie warstwy dielektryka o grubości poniżej 3 mm, wytrzymałości dielektrycznej poniżej 4 kV/m, występuje skuteczne źródło ładunku elektrostatycznego (np. obecność zmiennego pola elektromagnetycznego, fizyczne rozdzielanie ładunku, jonizacja przez strumień aerojonów) powodujące naładowanie powierzchni dielektryka do napięcia elektrostatycznego > 3 kV	sporadyczne (3)

Sytuacja	Określenie częstości zdarzenia P_4
Wykorzystywane są cienkie warstwy dielektryka o grubości poniżej 5 mm, wytrzymałości dielektrycznej poniżej 4 kV/m, występuje skuteczne źródło ładunku elektrostatycznego (np. obecność zmiennego pola elektromagnetycznego, fizyczne rozdzielanie ładunku, jonizacja przez strumień aerojonów) powodujące naładowanie powierzchni dielektryka do napięcia elektrostatycznego > 3 kV	rzadkie (2)
Wykorzystywane są cienkie warstwy dielektryka o grubości poniżej 10 mm, wytrzymałości dielektrycznej poniżej 4 kV/m, występuje skuteczne źródło ładunku elektrostatycznego (np. obecność zmiennego pola elektromagnetycznego, fizyczne rozdzielanie ładunku, jonizacja przez strumień aerojonów) powodujące naładowanie powierzchni dielektryka do napięcia elektrostatycznego > 3 kV	wyjatkowe (1)

Poszczególnym wskaźnikom P_i przypisano wartości liczbowe. Wyznaczenie prawdopodobieństwa powstania zapłonu mieszaniny wybuchowej odbywać się będzie z wykorzystaniem następującego wzoru:

$$P^* = \frac{\sum_{i=1}^4 P_i}{4}$$

gdzie:

P^* – miara prawdopodobieństwa powstania zapłonu mieszaniny wybuchowej,

P_i – wartości odczytane z tabel 4-7.

Końcowa miara prawdopodobieństwa powstania zapłonu wynikać będzie z kryteriów podanych w tabeli 8.

Tabela 8. Interpretacja wyznaczonej wartości prawdopodobieństwa

Wartość P^*	Ocena jakościowa
> 5,5	częste
4,5÷5,5	prawdopodobne
3,51÷4,5	sporadyczne
2,51÷3,5	rzadkie
1÷2,5	wyjatkowe

6.2.3. Skutki zapłonu mieszaniny wybuchowej

Skutki wybuchu są oceniane w trzech obszarach: wpływu na obiekty, wpływu na ludzi i wpływu na otoczenie (środowisko).

A. Wpływ na otoczenie

Skutki ewentualnego wybuchu należy oceniać w kontekście zniszczeń powodowanych przez falę ciśnienia (tab. 9-12). Dopuszcza się szacowanie na podstawie rozporządzenia ws. ochrony przeciwpożarowej lub stosowanie skali jakościowej na podstawie oszacowania skutku wybuchu przez osoby do tego przygotowane merytorycznie.

Tabela 9. Miara skutków wybuchu mieszaniny paliwa i utleniacza

Nadciśnienie wybuchu, kPa	Zniszczenia	Miara skutków S_1
0,1-0,3	Nieznaczne uszkodzenie powierzchni przeszklonych	lekkie (1)
1	Uszkodzenia instalacji, zniszczenia powierzchni przeszklonych	poważne (2)
3	Całkowite zniszczenie powierzchni przeszklonych, zniszczenie niektórych elementów konstrukcyjnych (lekkich dachów itp.)	poważne (3)
5	Istotne zniszczenia instalacji, konstrukcji lekkich, możliwe naruszenie konstrukcji nośnej obiektu	ciężkie (5)
7,5	Zniszczenie blaszanych ścian, naruszenie konstrukcji nośnej	katastroficzne (6)
12	Uszkodzenia budynków z bloczków betonowych	katastroficzne (7)

B. Wpływ na pracowników

Szacowania skutków dokonuje się na podstawie przewidywanej liczby osób narażonych oraz możliwych konsekwencji zdarzenia (tab. 10).

Tabela 10. Miara skutków wybuchu w kontekście obrażeń pracowników

Liczba narażonych osób	Skutki zdrowotne	Miara skutków S_2
> 10	Drobne oparzenia i urazy mechaniczne, niewymagające hospitalizacji	lekkie (1)
≥ 1	Urazy wymagające hospitalizacji, szczególnie poparzenia ciała i dróg oddechowych	poważne (2)

Liczba narażonych osób	Skutki zdrowotne	Miara skutków S_2
≥ 1	Możliwe skutki śmiertelne lub poważne urazy wymagające hospitalizacji	ciężkie (5)
> 5	Możliwe skutki śmiertelne lub poważne urazy wymagające hospitalizacji	katastroficzne (7)

C. Ocena wpływu wybuchu na środowisko

Oszacowanie wpływu wybuchu na środowisko odbywa się z wykorzystaniem danych z tabeli 11.

Tabela 11. Miara skutków wybuchu wpływających na środowisko

Wpływ na środowisko	Miara skutków S_3
Pomijalny wpływ na środowisko, niewystępowanie emisji substancji niebezpiecznych	lekkie (1)
Możliwy wpływ na środowisko, jednak usunięcie skutków możliwe siłami i środkami wewnętrznymi zakładu	poważne (3)
Istotny wpływ na środowisko, usunięcie skutków kosztowne i wymagające zaangażowania zewnętrznych podmiotów	ciężkie (5)
Istotny wpływ na środowisko, w tym skutki nieodwracalne w krótkim czasie, koszty usunięcia skutków wyższe niż możliwości zakładu, konieczność zaangażowania podmiotów zewnętrznych, konieczność zaangażowania służb publicznych	katastroficzne (7)

Poszczególnym wskaźnikom S_i przypisano wartości liczbowe. Określenie skutków ewentualnego wybuchu odbywa się z wykorzystaniem następującego wzoru:

$$S^* = \frac{\sum_{i=1}^3 S_i}{3}$$

gdzie:

S^* – miara skutków ewentualnego wybuchu,

S_i – kolejna miara skutków wybuchu, określona na podstawie danych zawartych w tabelach 9-11.

Końcowa miara prawdopodobieństwa powstania zapłonu wynika z kryteriów podanych w tabeli 12.

Tabela 12. Interpretacja wyznaczonej wartości skutków zdarzenia

Wartość S^*	Miara skutków
> 5	katastroficzne
$3,51 \div 5$	ciężkie
$2,01 \div 3,5$	poważne
< 2	lekkie

6.2.4. Wynik analizy ryzyka

Do oceny ogólnego poziomu ryzyka wybuchu spowodowanego przez niezupełne ESD zaleca się stosowanie metody matrycowej. Zestawiając ze sobą jakościowe miary prawdopodobieństwa (tab. 8) i skutków (tab. 12), tworzy się matrycę ryzyka tak, jak przedstawiono to w tabeli 13.

Tabela 13. Matryca ryzyka

Prawdopodobieństwo zdarzenia	Skutki			
	Katastroficzne	Ciężkie	Poważne	Lekkie
Częste	A	A	A	C
Prawdopodobne	A	A	B	C
Sporadyczne	A	B	B	D
Rzadkie	A	B	C	D
Wyjątkowe	B	C	C	D

Wynik tej analizy wskazuje dalsze postępowanie, gdy wystąpi:

Poziom D – nie są konieczne dalsze środki zaradcze, poziom ryzyka jest akceptowalny. Oceny ryzyka należy dokonywać przy każdej modyfikacji warunków bezpieczeństwa.

Poziom C – konieczne są działania zaradcze. Zwykle działania organizacyjne będą wystarczające. Po ich wprowadzeniu należy przeprowadzić ponowną analizę ryzyka.

Poziom B – konieczne jest wprowadzenie dodatkowych zabezpieczeń/modyfikacji technicznych oraz środków zaradczych organizacyjnych. Po zakończeniu należy przeprowadzić ponowną analizę ryzyka.

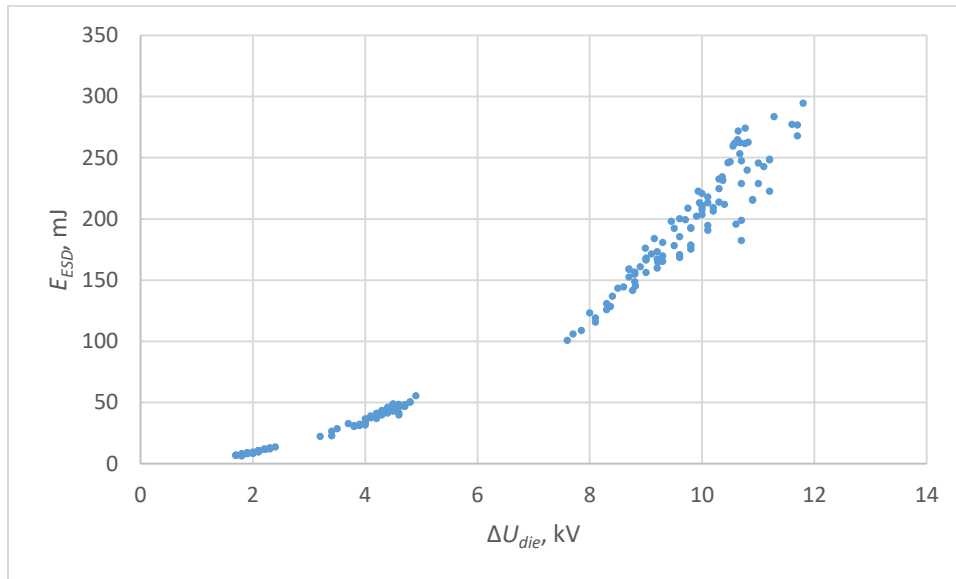
Poziom A – ryzyko nieakceptowalne. Zaleca się wstrzymanie procesu technologicznego i wprowadzenie technicznych i organizacyjnych środków bezpieczeństwa. Przed ponownym uruchomieniem procesu należy przeprowadzić ponowną ocenę ryzyka.

6.3. Metoda ilościowa oceny ryzyka (*in situ*)

6.3.1. Szanowanie energii

Możliwe jest przeprowadzenie szacowania energii niezupełnego ESD *in situ* w warunkach, w których zachodzi dany proces technologiczny. Do tego niezbędne jest wykorzystanie jednego z dostępnych na rynku woltomierzy elektrostatycznych. Przykładem jest woltomierz elektrostatyczny JCI 140 stosowany podczas pracy badawczej realizowanej w Centralnym Instytucie Ochrony Pracy – Państwowym Instytucie Badawczym. Woltomierz ten ma dwie skale pomiaru napięcia: 2 oraz 20 kV, a rozdzielczość pomiaru odpowiednio 1 oraz 10 V. Przyrząd ma klasę 2. dokładności; zasila go bateria 9 V. Jest wyposażony w dedykowane gniazdo służące do podłączenia uziemienia, konieczne do bezpiecznego i rzetelnego przeprowadzania pomiarów. Pomiaru są wykonywane bezkontaktowo z odległości 100 mm od badanej powierzchni. Oś urządzenia pomiarowego powinna być położona wzdłuż wektora normalnego do badanej powierzchni.

Zjawisko niezupełnego ESD powstaje, jeżeli na powierzchni dielektryka zgromadzi się odpowiednia ilość ładunku elektrycznego. Dielektryk ma bardzo dużą (rzędu $10^{12} \Omega\text{m}$) rezystywność skośną, jednak jest ona skończona, co znaczy, że z czasem zgromadzony ładunek przeniesie się do uziemienia, przy założeniu że źródło elektryzacji nie jest obecne. A zatem proces technologiczny będzie zagrożony, jeżeli proces akumulacji ładunku, czy to na skutek tarcia, czy indukcji, będzie następował szybciej niż proces samoczynnego rozładowania powierzchni dielektryka. Możliwe jest zbadanie tej sytuacji *in situ* w zakładzie przemysłowym przez monitorowanie napięcia elektrostatycznego w trakcie realizacji obserwowanego procesu technologicznego. Jeżeli okaże się on niebezpieczny, tj. obserwowane jest napięcie powyżej 4 kV (opisany warunek konieczny do powstania wyładowania snopiastego rozprzestrzeniającego się), należy posłużyć się poniższym wykresem (rys. 6) w celu oszacowania możliwej maksymalnej energii, która wydzieli się w danych warunkach.



Rysunek 6. Zależność różnicy napięć elektrostatycznych zmierzonych po wyładowaniu i przed nim oraz energii wyładowania snopiastego rozprzestrzeniającego się. Źródło: opracowanie własne

Zależność ta jest wykładnicza (eksponencjalna) i może być aproksymowana linią trendu zgodnie z poniższą zależnością:

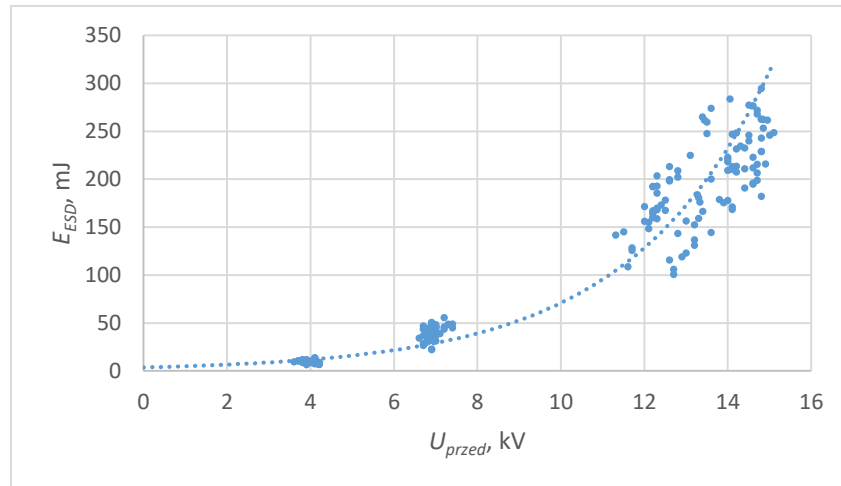
$$E_{ESD} = 6,075 \cdot e^{0,356 \cdot \Delta U_{die}}$$

gdzie:

E_{ESD} – energia wyładowania snopiastego rozprzestrzeniającego się, mJ,

ΔU_{die} – różnica napięcia elektrostatycznego zmierzonego po wyładowaniu (U_{po}) i przed nim (U_{przed}), kV.

Ze względów praktycznych metoda stosowana *in situ* powinna bazować na zmierzonej wartości napięcia, bez konieczności oczekiwania na wystąpienie wyładowania czy wywoływania go przez pracownika dokonującego pomiarów. Dlatego wyznaczone wartości energii można odnieść do napięcia U_{przed} , czyli zmierzonego bezkontaktowo w warunkach przed wyładowaniem. Dane zestawiono na rysunku 7.



Rysunek 7. Zależność napięcia zmierzonego przed wyładowaniem oraz energii wyładowania snopiastego rozprzestrzeniającego się. Źródło: opracowanie własne

Funkcja aproksymacyjna przyjmuje postać zależności:

$$E_{ESD} = 3,6431 \cdot e^{0,2968 \cdot U_{przed}}$$

gdzie:

E_{ESD} – szacowana energia wyładowania, mJ,

U_{przed} – napięcie elektrostatyczne zmierzone przed wyładowaniem, kV.

Podstawową zaletą metody jest jej prostota. Wymaga jedynie zastosowania urządzenia pomiarowego dostępnego na rynku, które jest kalibrowane zgodnie z wymogami producenta, co zapewni dokładność rzędu 20÷25%.

Z punktu widzenia bezpieczeństwa badania szacowania energii niezupełnego ESD powinny być przeprowadzane przez wykwalifikowanego pracownika, posiadającego świadectwo kwalifikacji E w zakresie urządzeń elektroenergetycznych. Pracownik powinien być przeszkolony z zakresu zagrożeń wyładowaniami elektrostatycznymi i powinien wykorzystywać rękawice dielektryczne podczas wykonywania pomiaru. Zminimalizuje to ryzyko wystąpienia porażenia. Pracownik powinien także szczegółowo zapoznać się z instrukcją obsługi urządzenia i znać określone przez producenta warunki prowadzenia pomiarów.

6.4. Porównanie minimalnej energii zapłonu mieszanin substancji palnych z powietrzem

W celu ilościowej oceny ryzyka zapłonu należy oszacowaną wartość energii wydzielonej podczas wyładowania elektrostatycznego niepełnego odnieść do wartości MEZ. Wartości te są podane w literaturze (dla wielu mieszanin gazów palnych i par cieczy palnych z powietrzem, a także pyłów palnych z powietrzem). Szczególnie jednak w przypadku występowania pyłów o niejednorodnej strukturze i pochodzeniu zaleca się zlecenie laboratoriom badawczym określenie wartości MEZ.

Poniżej (tab. 14-16) zestawiono przykładowe wartości MEZ dla mieszanin gazowych, par cieczy palnych oraz pyłów palnych z powietrzem.

Tabela 14. Minimalna energia zapłonu wybranych gazów palnych

Gaz palny	MEZ [mJ]	Gaz palny	MEZ [mJ]
Disiarczek węgla	0,068	Metan	0,29
Etylen	0,08	Butan	0,25
Acetylen	0,017	Propan	0,25
Wodór	0,017		

Tabela 15. Minimalna energia zapłonu wybranych par cieczy palnych

Ciecz palna	MEZ [mJ]	Ciecz palna	MEZ [mJ]
Octan etylu	1,42	Toluen	0,24
Aceton	1,15	Heptan	0,24
Benzyna	0,8	Benzen	0,2
Alkohol izopropylowy	0,65	Alkohol metylowy	0,2

Tabela 16. Minimalna energia zapłonu wybranych pyłów palnych

Pył palny	MEZ [mJ]	Pył palny	MEZ [mJ]
Cynk	960	Skrobia ziemniaczana	30-60
Węgiel (Pittsburg)	250	Likopodium	50
Kawa palona	160	Cukier	30
Mąka	25-80	Siarka	15

W związku ze złożonością zjawiska zaleca się przyjęcie marginesu bezpieczeństwa na poziomie jednego rzędu wielkości, tj.:

$$E_{ESD} < MEZ/10$$

gdzie:

E_{ESD} – oszacowana energia wyładowania, [mJ],

MEZ – minimalna energia zapłonu substancji palnej w powietrzu, występująca w danym procesie technologicznym.

Uwaga: w przypadku występowania wielu substancji palnych do szacowania należy przyjmować zawsze najniższą wartość MEZ .

7. Podsumowanie

Natura powstawania niezupełnych ESD jest złożona. Wydzielona energia zależy od wielu czynników. Możliwa jest jakościowa ocena ryzyka powstania zapłonu mieszaniny wybuchowej, a także jej dokonanie metodą ilościową, bazującą na pomiarze napięcia elektrostatycznego na powierzchni materiału nieprzewodzącego. Typowe energie wyładowania snopiastego rozprzestrzeniającego się są zwykle na tyle duże, iż mogą doprowadzić do zapłonu większości mieszanin gazowych i par cieczy palnych, jak również znacznej części mieszanin pyłowych. Zjawisko to powinno być zatem eliminowane w środowisku pracy.

8. Literatura

Akty prawne i dyrektywy

Dyrektywa ATEX Parlamentu Europejskiego i Rady 2014/34/UE z dnia 26 lutego 2014 r. w sprawie harmonizacji ustawodawstw państw członkowskich odnoszących się do urządzeń i systemów ochronnych przeznaczonych do użytku w atmosferze potencjalnie wybuchowej (Dz.Urz. UE L 96/309).

Dyrektywa ATEX USER 1999/92/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z 16 grudnia 1999 r. w sprawie minimalnych wymagań dotyczących bezpieczeństwa i ochrony zdrowia pracowników zatrudnionych na stanowiskach pracy, na których może wystąpić atmosfera wybuchowa (Dz.Urz. UE L 023/2000).

Rozporządzenie Ministra Rozwoju z dnia 6 czerwca 2016 r. w sprawie wymagań dla urządzeń i systemów ochronnych przeznaczonych do użytku w atmosferze potencjalnie wybuchowej (Dz.U. poz. 817).

Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 7 czerwca 2010 r. w sprawie ochrony przeciwpożarowej budynków, innych obiektów budowlanych i terenów (Dz.U. Nr 109, poz. 719).

Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 8 lipca 2010 r. w sprawie minimalnych wymagań, dotyczących bezpieczeństwa i higieny pracy, związanych z możliwością wystąpienia w miejscu pracy atmosfery wybuchowej (Dz.U. Nr 138, poz. 931).

Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 21 listopada 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. 2017 poz. 282).

Rozporządzenie Ministra Gospodarki, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 23 grudnia 2003 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy produkcji i magazynowaniu gazów, napełnianiu zbiorników gazami oraz używaniu i magazynowaniu karbidu (Dz.U. 2004 Nr 7, poz. 59).

Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 roku w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz.U. 2017 poz. 2285).

Normy

PN-EN 62305-1:2011 Ochrona odgromowa – Część 1: Zasady ogólne.

PN-E-05204:1994 Ochrona przed elektrycznością statyczną – Ochrona obiektów, instalacji i urządzeń – Wymagania.

PN-EN 1127-1:2019 Atmosfery wybuchowe – Zapobieganie wybuchowi i ochrona przed wybuchem – Część 1: Pojęcia podstawowe i metodyka.

PN-EN IEC 60079-0:2018-09 Atmosfery wybuchowe – Część 0: Urządzenia – Podstawowe wymagania.

PN-EN 60079-10-1:2016-02 Atmosfery wybuchowe – Część 10-1: Klasyfikacja przestrzeni – Gazowe atmosfery wybuchowe.

PN-EN 60079-17:2014-05 Atmosfery wybuchowe – Część 17: Kontrola i konserwacja instalacji elektrycznych.

PN-EN 60079-20-1:2010 Atmosfery wybuchowe – Część 20-1: Właściwości materiałowe dotyczące klasyfikacji gazów i par – Metody badań i dane tabelaryczne.

Opracowania zwarte

G.P. Ackroyd, P. Caine, *An investigation of the occurrence of propagating brush discharges from Type B flexible intermediate bulk containers with liners*, Journal of Electrostatics 67 (2009), s. 256-262, <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2009.01.010> (data dostępu: 28.05.2020).

J. Cross, *Electrostatics: principles, problems and applications*, Taylor & Francis, Bristol 1987.

S. Egan, *Learning lessons from five electrostatic incidents*, Journal of Electrostatics 88 (2017), s. 183-189, <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2017.01.002> (data dostępu: 28.05.2020).

W. Fath, C. Blum, M. Glor, C.-D. Walther, *Electrostatic ignition hazards due to pneumatic transport of flammable powders through insulating or dissipative tubes and hoses – New experiments and calculations*, Journal of Electrostatics 71 (2013), pp. 377-382, <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2012.11.011> (data dostępu: 28.05.2020).

- S. Forestier, J.-M. Dien, M. Glor, *Ignition of a cloud of dry powder using super brush discharges*, Journal of Electrostatics 88 (2017), pp. 177-182, <https://doi.org/10.3303/CET1648060> (data dostępu: 28.05.2020).
- S. Ptak, M. Półka, *Wpływ biomasy na parametry palności i wybuchowości pyłu węgla kamiennego*, SGSP, Warszawa 2018.
- Z. Grabarczyk, *Pomiar ładunku elektrycznego przenoszonego w czasie wyładowania elektrostatycznego dla potrzeb oceny ryzyka zapłonu atmosfer wybuchowych i rażeń elektrostatycznych*, Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Zarządzania Ochroną Pracy w Katowicach 1 (2011), s. 5-20.
- Z. Grabarczyk, *Laboratory ignition of hydrogen and carbon disulphide in the atmospheric air by positive corona discharge*, Journal of Electrostatics 71 (2013), s. 1041-1045, <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2013.09.007> (data dostępu: 28.05.2020).
- Z. Grabarczyk, A. Kurczewska, *Zagrożenia elektrostatyczne w strefach zagrożonych wybuchem*, CIOP-PIB, Warszawa 2008.
- M.N. Horenstein, *A Simulation Model for Understanding Propagating Brush Discharges: Comparison of Theory and Experiments*, IEEE Transactions on Industry Applications 47 (2011), s. 344-349, <https://doi.org/10.1109/TIA.2010.2091197> (data dostępu: 28.05.2020).
- Q. Liu, J. Huang, H. Shao, Y. Zhang, *Electric ignition energy evaluation and the energy distribution structure of energy released in electrostatic discharge process*, Chinese Physics B 26 (2017), s. 105-202.
- G. Luttgens, N. Wilson, *Electrostatic hazards*, Butterworth-Heinemann, Oxford 1997.
- S. Ptak, A. Smalcerz, P. Ostrowski, *Feasibility study on the use of fast camera and recording in time-domain to characterize ESD*, Fire and Environmental Safety Engineering 247 (2018), https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2018/106/mateconf_fese2018_00028/matec-conf_fese2018_00028.html (data dostępu: 28.05.2020).
- E. Randeberg, W. Olsen, R.K. Eckhoff, *A new method for generation of synchronised capacitive, sparks of low energy*, Journal of Electrostatics 64 (2006), s. 263-272, <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2005.07.001> (data dostępu: 28.05.2020).
- A. Smalcerz, S. Ptak, P. Ostrowski, *Wybrane zagrożenia elektrostatyczne wywołane wyładowaniami niezupełnymi*, Śląskie Wiadomości Elektryczne 1 (2019), s. 16-19.
- M. Talarek, R. Kacprzyk, *Direct ignition tests of brush discharges for explosive methane-air and propane-air gas mixtures*, Journal of Electrostatics 88 (2017), s. 165-170, <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2017.01.017> (data dostępu: 28.05.2020).
- Z.A. Tamus, I. Kiss, N. Szedenik, M. Keindl, *Effective method for measuring the energy of propagating brush discharges*, Journal of Electrostatics 67 (2009), s. 267-270, <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2008.12.010> (data dostępu: 28.05.2020).
- I. Van Laar, *Static electricity as a hazard in industry*, Journal de Physique III 1 (1991), s. 1377-1387.
- M. Yamaguma, T. Kodama, *Observation of Propagating Brush Discharge on Insulating Film With Grounded, Antistatic Materials*, IEEE Transactions On Industry Applications 40 (2004), s. 451-456, <https://doi.org/10.1109/TIA.2004.824512> (data dostępu: 28.05.2020).
- S. Zhong, N. Miao, Q. Yu, W. Cao, *Energy measurement of spark discharge using different triggering methods and inductance loads*, Journal of Electrostatics 73 (2015), s. 97-102, <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2014.10.014> (data dostępu: 28.05.2020).