

## METODA ANALIZY I OCENY RYZYKA POTENCJALNYCH ZDARZEŃ ZAGRAŻAJĄCYCH W PROJEKTOWANIU SYSTEMU DETEKCJI GAZÓW WYBUCHOWYCH W OBIEKTACH PRZEMYSŁOWYCH

Ireneusz ROGALA<sup>1</sup>, Kazimierz T. KOSMOWSKI<sup>2</sup>

1. Automatic Systems Engineering Sp. z o.o.  
tel.: 58 5207766 e-mail: i.rogala@ase.com.pl
2. Politechnika Gdańska, WEiA  
tel.: 58 347 2439 e-mail: kazimierz.kosmowski@ely.pg.gda.pl

**Streszczenie:** W celu zmniejszenia ryzyka związanego z potencjalnym wybuchem gazów tworzących atmosferę wybuchową stosuje się systemy detekcji gazów. Ich zadaniem jest wykrycie zagrożenia i odpowiednia reakcja w celu zredukowania ryzyka np. przez odpowiednie ostrzeżenie i uruchomienie odpowiedniej wentylacji. Systemy te powinny spełniać standardy przemysłowe, a w określonych warunkach powinny być zaprojektowane zgodnie z wymogami bezpieczeństwa funkcjonalnego. W ramach analizy i oceny ryzyka związanego z zagrożeniem wybuchu można uzyskać istotną poprawę stanu bezpieczeństwa poprzez właściwy dobór systemów detekcji gazów wybuchowych, posługując się odpowiednią metodyką. W artykule zostanie przedstawiony przykład analizy ryzyka i doboru urządzeń systemu detekcji gazów, z uwzględnieniem określenia wymaganego poziomu SIL i weryfikacji tego poziomu dla przykładowego systemu detekcji.

**Słowa kluczowe:** ryzyko, wybuch, detekcja, niezawodność, bezpieczeństwo funkcjonalne, ATEX.

### 1. ZAGROŻENIE WYBUCHEM W PRZEMYSŁE

#### 1.1. Zagrożenie wybuchem atmosfery gazowej

W znacznej liczbie zakładów przemysłowych występują w technologii materiały, które stwarzają zagrożenie wybuchem, czy to wskutek uwolnienia wynikającego z racji technologicznych, czy też z racji normalnego zużycia maszyn i urządzeń prowadzącego do uwolnienia substancji tworzących atmosferę wybuchową. Przemysł światowy od lat zajmuje się tymi zagadnieniami i wypracował standardowe podejście do ich rozwiązywania. Jest to zadanie ważne z uwagi na możliwe konsekwencje dla osób znajdujących się w obszarze wybuchu oraz straty materialne, ale występują sytuacje, gdy podejście standardowe jest niewystarczające.

Przedmiotem niniejszego artykułu jest system detekcji gazów wybuchowych, jako środek redukcji ryzyka wybuchu oraz wpływ jego niezawodności na wyniki analizy i oceny ryzyka wybuchu, przy czym proponuje się, aby analizować to zagadnienie z wykorzystaniem z jednej strony metody analizy warstw zabezpieczeń, a z drugiej strony oceny zapewnienia niezawodności realizacji funkcji bezpieczeństwa z wykorzystaniem bezpieczeństwa funkcjonalnego

#### 1.2. Scenariusz awaryjny zdarzenia i podejście standardowe

Scenariusz awaryjny wybuchu ma następujący przebieg: uwolnienie substancji palnej o właściwościach wybuchowych, utworzenie atmosfery wybuchowej poprzez wymieszanie z tlenem z atmosfery, zapłon od efektywnego źródła znajdującego się w obszarze w którym dana atmosfera wybuchowa się utworzyła prowadzący bezpośrednio do wybuchu oraz wybuch z następującymi po nim konsekwencjami.

Schemat zapewnienia bezpieczeństwa przeciwwybuchowego zaakceptowany przez światowe gremia przemysłowe i naukowe, znajdujący swe odzwierciedlenie m. innymi w dyrektywie UE ATEX USERS (nr. 1999/94/WE) [1] realizuje się w trzech, kolejno po sobie następujących, krokach adekwatnych do wcześniej wskazanego scenariusza awaryjnego.

- Po pierwsze należy zapewnić minimalizację możliwości uwolnień substancji mogących utworzyć atmosferę wybuchową (i to zarówno gazową jak i pyłową).
- Po drugie dla obszarów, gdzie mimo wszystko istnieje prawdopodobieństwo powstania i utrzymywania się atmosfery wybuchowej, należy zadbać o eliminację możliwych, efektywnych źródeł zapłonu dla uformowanej atmosfery wybuchowej.
- Trzeci krok odnosi się do sytuacji, w której doszło do wybuchu, kiedy należy zadbać o redukcję skutków wybuchu do poziomu akceptowalnego w danych warunkach.

Taki warstwowy system zapewnienia bezpieczeństwa koreluje z modelem warstw zabezpieczeń w bezpieczeństwie procesowym i systemu analizowania zagrożeń wg. metody LOPA (*Layer of Protection Analysis*) [2, 3].

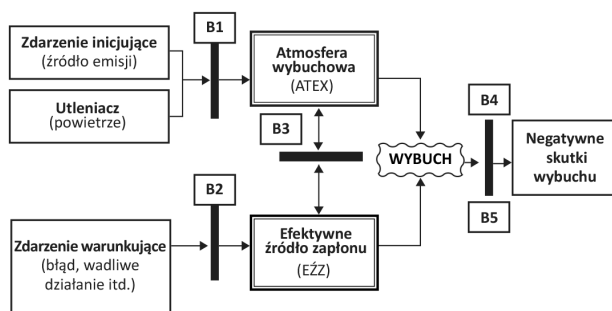
W celu zrealizowania tego schematu zapewnienia bezpieczeństwa dokonuje się analizy i oceny ryzyka wybuchu, podczas której oceniane jest prawdopodobieństwo uwolnienia substancji i utworzenia atmosfery wybuchowej w danej lokalizacji. Następnie oceniane są rozmiar występowania, trwałość i własności fizykochemiczne, palne i wybuchowe, jakie dana atmosfera prezentuje. Nazywa się to klasyfikacją stref zagrożenia wybuchem. A w tych miejscach, gdzie z określonym prawdopodobieństwem może występować atmosfera wybuchowa, dokonuje się następnie

oceny prawdopodobieństwa występowania efektywnych źródeł zapłonu. Na koniec analizy zagrożenia wybuchem dokonuje się analizy prawdopodobnych możliwych jego skutków.

W znacznej liczbie przypadków warto skorzystać ze sprawdzonych metod ilościowych lub półilościowych dla poszczególnych scenariuszy, awaryjnych w analizach ryzyka związanych z zagrożeniem wybuchem w celu osiągnięcia konkretnych efektów. W przypadku bezpieczeństwa przeciwybuchowego będą one związane dość ściśle z miejscem prawdopodobnego uwolnienia substancji mogących tworzyć atmosfery wybuchowe. Takie podejście prezentowane jest również przez zespół prof. Adama Markowskiego z Łodzi, który zaproponował dostosowanie systemu AWZ (Analiza Warstw Zabezpieczeń) dla potrzeb bezpieczeństwa przeciwybuchowego oznaczając go nazwą rynkową Ex-AWZ [4]

### 1.3. Schemat ochrony przeciwybuchowej i wskazanie analizowanego węzła

Schemat warstwowy ochrony przeciwybuchowej przedstawiono na rys. 1. Zadania poszczególnych warstw zabezpieczeń są rozdzielone i niezależne oraz realizowane niezależnie. Schemat ten pozwala zobrazować podejście do sposobu analizowania ryzyka wybuchu i wydzielenia poszczególnych zadań bezpieczeństwa.



Rys. 1. Scenariusz rozwoju zdarzeń wraz z warstwami zabezpieczeń dla obiektu, gdzie występują atmosfery wybuchowe

W tej sekwencji zdarzeń warstwy zabezpieczające realizują następujące funkcje:

- B1 – warstwa zapobiegania emisji substancji palnych i powstawaniu atmosfer wybuchowych,
- B2 – warstwa zapobiegania występowaniu efektywnych źródeł zapłonu,
- B3 – warstwa środków kontroli operacyjnej,
- B4 – warstwa zapobiegania skutkom wybuchu,
- B5 – warstwa ograniczenia skutków wybuchu.

W dalszej części będziemy się zajmować skutecznością działania warstwy B1. Zdefiniujemy prawdopodobieństwo uwolnienia substancji stwarzającej zagrożenia wybuchem oraz wymóg co do redukcji ryzyka przez system detekcji i wentylacji - jak to pokazano na rys. 2. Następnie, dla zaproponowanego rozwiązania, zostanie zweryfikowany poziom niezawodności pod kątem wypełnienia wymaganej funkcji bezpieczeństwa.

### 1.4. Metoda jakościowa wg. standardu IEC

Światowy standard klasyfikacji przestrzeni zagrożonych wybuchem gazów został stosunkowo niedawno zmieniony [5] i podaje możliwość obniżenia

kategorii strefy odpowiednio do wydajności i dyspozycyjności systemu wentylacji. Parametry te są oceniane jakościowo w skali trzystopniowej. Stosownie do przyjmowanej wartości korygują ocenę jakościową kategorii strefy zagrożenia wybuchem i jej rozmiar. W schemacie na rys. 1 są one reprezentowane w warstwie B1 oraz częściowo w warstwie B3. Dodatkowo aktualna norma [5] powołuje się na szereg możliwości oceny niezawodności wypełnienia danej funkcji bezpieczeństwa na bazie analizy i oceny ryzyka, determinacji wymaganego poziomu redukcji ryzyka poprzez system bezpieczeństwa i weryfikacji wypełnienia tego zadania.

## 2. ZASTOSOWANIE BEZPIECZEŃSTWA FUNKCJONALNEGO

### 2.1. Określenie poziomu nienaruszalności bezpieczeństwa dla danej funkcji

Zagadnienie niezawodności systemu detekcji jest ważne z punktu widzenia operatorów zakładów przemysłowych z trzech powodów.

Po pierwsze są oni zobligowani do wdrażania środków redukcji ryzyka i to w kolejności wyżej przedstawionej, zatem właściwie skonfigurowany system detekcji występowania gazów wybuchowych może mieć tu istotne zastosowanie. Po drugie od sprawności działania systemu detekcji, jego niezawodności i właściwej współpracy z systemami wentylacji oraz sygnalizacji zależy efektywność ograniczenia zagrożeń. Można przez to uzyskać znaczne ograniczenie nakładów finansowych na zapewnienie bezpieczeństwa przeciwybuchowego.

Po trzecie niezawodność systemu detekcji (i sygnalizacji) pośrednio wpływa również na rozmiar skutków zdarzenia niepożądanego – poprzez zmniejszenie ekspozycji osób na zagrożenie, a także, w pewnych wypadkach, (przez ograniczenie ilości substancji uwolnionych i możliwości ich kontrolowania) zmniejszenie potencjału zniszczeń i strat. W sytuacjach wątpliwych oraz w szczególnych przypadkach, kiedy zależy nam jako np. projektantom na dość dokładnym zdefiniowaniu rozmiaru i kategorii strefy zagrożenia wybuchem, proponuje się zastosowanie narzędzi oceniających niezawodność działania systemu. To z kolei prowadzi do przynajmniej półilościowej oceny możliwości pojawienia się atmosfery wybuchowej w danym miejscu. W takim przypadku może mieć zastosowanie bezpieczeństwo funkcjonalne w formule opisanej dla takich rozwiązań w dwu normach sektorowych tj. dla systemów detekcji gazów [6] oraz dla systemów pracujących w strefach zagrożonych wybuchem [7].

Szerszy opis zastosowania bezpieczeństwa funkcjonalnego w realizacji zadań bezpieczeństwa w przemyśle odnajdujemy w pracach monograficznych publikowanych w Polsce na przestrzeni ostatnich 12 lat [8, 9, 10, 11].

Drzewo zdarzeń uwzględnia sukcesywnie następujące sytuacje:

Zainstalowany czujnik detekcji gazu zadziałał / nie zadziałał prawidłowo. Jeśli nie zadziałał wówczas nie nastąpi uruchomienie wentylacji awaryjnej dojdzie do zdarzenia krytycznego.

Jeśli zadziała czujnik detekcji wówczas w sekwencji zdarzeń może zadziałać / nie zadziałać element logiczny odpowiedzialny za wysterowanie sygnału do elementu wykonawczego. Niezadziałanie prowadzi, jak poprzednio, do zdarzenia krytycznego, zaś zadziałanie do kolejnego

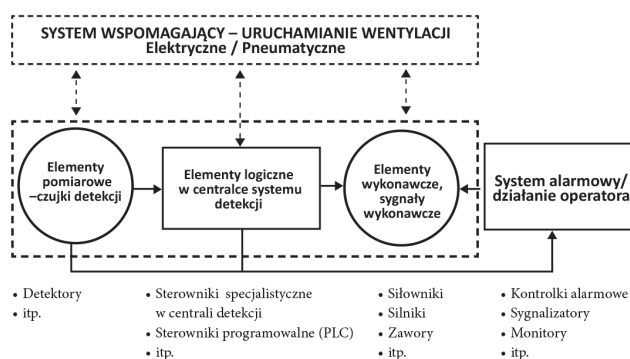
elementu. Jeśli element wykonawczy otrzyma wystawiony sygnał alarmowy powinien zrealizować alarm i uruchomić dodatkową wentylację – awaryjną, w celu usunięcia prawdopodobnej obecności czynnika wybuchowego gazu, zmniejszenia jego stężenia do poziomu dopuszczalnego tj. poniżej 10% Dolnej Granicy Wybuchowości (DGW). Zakładamy poprawny dobór wydajności wentylacji do rozmiaru spodziewanego uwolnienia, co oznacza, że uruchomienie wentylacji niweluje zagrożenie wybuchem. Analiza scenariusza awaryjnego wskazuje na potrzebę redukcji ryzyka (dla uzyskania efektów ekonomicznych w odniesieniu do kryteriów) o co najmniej 100 razy w stosunku do sytuacji, gdyby nie zastosowano dodatkowo systemu detekcji z wentylacją. Po zastosowaniu dodatkowego systemu bezpieczeństwa dokonujemy sprawdzenia jego skuteczności w realizacji funkcji bezpieczeństwa poprzez weryfikację poziomu SIL jaki powinien być przez ten system zapewniony. SIL jest skrótowcem od Safety Integrity Level i oznacza poziom nienaruszalności bezpieczeństwa (dla danego obwodu).

## 2.2. Obwód bezpieczeństwa

Typowy układ realizacji funkcji bezpieczeństwa dla tak zdefiniowanego scenariusza awaryjnego pokazany jest na rys. 2. W ramce narysowanej linią przerywaną ujęto system realizujący bezpośrednio funkcje bezpieczeństwa, którego niezawodność chcemy określić. W dalszej kolejności będzie to odniesione do spełnienia wymagań lub wskazań uzyskanych w analizach dla potrzeb klasyfikacji stref zagrożenia wybuchem.

W ramach analizy AWZ uzyskujemy dla niezależnej warstwy B1 wymóg redukcji ryzyka na poziomie odpowiadającym SIL 2 (czyli co najmniej 100 razy) dla obwodu realizującego funkcję detekcji gazów wybuchowych. Następnie weryfikujemy obliczeniowo, czy ten wymóg przez konkretną specyfikację sprzętu, w konkretnej konfiguracji jest spełniony.

W tym przypadku przyjmujemy strukturę liniową realizacji funkcji bezpieczeństwa, w której czujnik, element logiczny i wykonawczy połączone są liniowo.



Rys. 2. Realizacja funkcji bezpieczeństwa przez obwód bezpieczeństwa SIS odpowiadający warstwie B1

Dane niezawodnościowe dla weryfikacji realizacji wymaganego poziomu SIL przyjmujemy korzystając z bazy danych uznanego w świecie programu eXILENTIA [12] firmy exida™ i uzyskujemy wynik na bazie niezawodności poszczególnych elementów obwodu i jego struktury.

W systemie wykorzystano czujniki detekcji firmy Industrial Scientific o poziomie SIL 2 oraz sterownik programowalny firmy SIEMENS z jednostką centralną CPU będącą częścią systemu certyfikowanego do poziomu SIL 3.

Jako element wykonawczy przyjęto w tym wypadku kolumnę sygnalizacyjną z sygnalizacją kolorów i modułem syreny dźwiękowej.

Z uwagi na fakt, iż na rynku nie ma tego typu rozwiązań certyfikowanych do oznaczonego poziomu niezawodności należało, wykorzystując metodę analizy RBD (ang. *Reliability Block Diagram*) i modelując niezawodnościowy system szeregowy, uzyskać całkowitą wartość intensywności uszkodzeń dla całej kolumny sygnalizacyjnej. Ta dana posłużyła następnie dla weryfikacji niezawodności całego systemu.

Prawdopodobieństwo niewypełnienia funkcji bezpieczeństwa (ang. *Probability Failure on Demand*) w czasie (PFD (t)) wynika z pojawiających się z pewną intensywnością  $\lambda_{DU}$  [1/h] uszkodzeń niebezpiecznych niewykrywalnych (ang. *danger undetected*).

Dla rozważań o charakterze inżynierskim (tu mających zastosowanie dla analizy konkretnego rozwiązania technicznego) przyjmujemy uproszczony model wyznaczania średniego PFD wg. wzoru:

$$PFD_{avg} \cong (\lambda_{DU} * T_i) / 2 \quad (2.1)$$

gdzie:  $T_i$  oznacza interwał testowania [h].

W strukturze liniowej, jaka tu występuje, PFD poszczególnych podsystemów dodaje się, zatem wartość średnia przybliżona całego systemu:

$$PFD_{avgSIS} \cong PFD_{avgSIScz} + PFD_{avgSISlog} + PFD_{avgSISwyk} \quad (2.2)$$

gdzie: indeks SIS oznacza cały system, indeksy cz / log / wyk oznaczają odpowiednio podsystemy - czujnika, logiczny i wykonawczy.

Dla wybranej specyfikacji sprzętu na bazie danych niezawodnościowych z [12] uzyskujemy w takim razie następujące wartości:

$$PFD_{avgSIS} \cong 2,12 * 10^{-6} + 1,97 * 10^{-4} + 1,21 * 10^{-3} = 1,41 * 10^{-3}$$

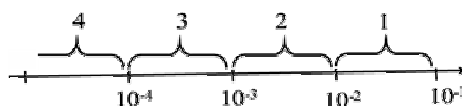
Dane przyjęte do obliczeń to odpowiednio:

$$\lambda_{DUcz} = 3,54 * 10^{-7} [1/h], \quad \lambda_{DUlog} = 4,49 * 10^{-8} [1/h],$$

$$\lambda_{DUwyk} = 2,76 * 10^{-7} [1/h],$$

$$T_{iDUcz} = 12[h], \quad T_{iDUlog} = 8760[h], \quad T_{iDUwyk} = 8760 [h]$$

Redukcja ryzyka dla obwodu osiąga w tym przypadku wartość adekwatną dla SIL 2, jak przedstawiono to na rys. 3, co spełnia wymagania postawionych przed systemem detekcji jako podsystemem odpowiedzialnym za właściwe zadziałanie systemu wentylacji uzyskane w wyniku analizy i oceny ryzyka wybuchu.



Rys. 3. Redukcja ryzyka odpowiadająca poziomom SIL – nad osią pokazano poziomy SIL, pod osią kryteria probabilistyczne  $PFD_{avg}$ .

Ważna w tym przypadku jest również dyskusja nad strukturą obwodu bezpieczeństwa i wartościami intensywności uszkodzeń poszczególnych elementów obwodu.

Elementy o znaczeniu kluczowym, czyli czujnik detekcji i element logiczny mają wartości wskaźnika intensywności uszkodzeń niebezpiecznych o niskiej wartości. Elementy pomiarowe detekcji (tu zastosowane) mają dodatkowo wbudowany system testujący – stąd pojawia się bardzo krótki czas okresu testowania  $T_{iDUcz}$ . Bez takiego uzupełnienia układu w części detekcyjnej, przy znacznie dłuższych czasach interwałów testowania wartość  $PFD_{avgSISz}$  znacznie podniosłaby się, co w efekcie miałyby istotny wpływ na wartość  $PFD_{avgSIS}$  dla całego obwodu, Element wykonawczy, jest końcowym elementem obwodu, i jak widać, to jego niezawodność w zasadzie decyduje o poziomie niezawodności całego układu, ale nie wpływa on na obniżenie skuteczności członów poprzedzających. Dyskusji należy poddać również pokrycie diagnostyczne dla realizowanych funkcji. Tu w modelu obliczeniowym jest to uwzględnione w danych z programu [12] dla rozpatrywanych urządzeń.

Z punktu widzenia projektanta oraz analityka oceniających zagrożenie wybuchem, a także proponujących środki redukcji ryzyka, ważne jest pozyskanie wiarygodnej informacji analitycznej w odniesieniu do tego systemu SIS realizującego funkcje bezpieczeństwa dla warstwy B1, czyli ograniczenia rozmiaru i trwałości strefy zagrożonej wybuchem [13]. W takim przypadku mogą oni zaproponować znaczące obniżenie kosztów dla sprzętu instalowanego w obszarach z których dzięki SIS strefa zagrożenia wybuchem zostanie usunięta. Może to dać radykalne obniżenie kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych oraz uproszczenie instalacji. Różnica kosztów nabycia i eksploatacji systemów zwykłych oraz w wykonaniu przeciwybuchowym może przekraczać rząd wielkości – co w odniesieniu do kosztów wykonania nawet szczegółowej analizy ilościowej może być znaczną korzyścią.

### 3. WNIOSKI KOŃCOWE

Zastosowanie zweryfikowanej metodyki analizowania ryzyka w wybranych zastosowaniach może mieć istotny wpływ na poziom bezpieczeństwa pracy instalacji jako całości [14]. Może ono również w istotnej mierze przyczynić się do racjonalizacji kosztów instalacji i eksploatacji systemów technicznych. Wymagana wiedza z zakresu bezpieczeństwa funkcjonalnego jest dostępna w Polsce i może stanowić istotne wsparcie dla projektantów i osób zajmujących się zapewnieniem bezpieczeństwa w obiektach, gdzie występują strefy zagrożone wybuchem. Zastosowanie skutecznych metod analizy może dodatkowo mieć istotny wpływ na konkurencyjność proponowanych rozwiązań, a w efekcie konkurencyjność danego przedsiębiorstwa w ogólności.

## METHOD OF ANALYSIS AND RISK ASSESSMENT OF POTENTIAL INCIDENTS IN THE DESIGNING SYSTEM DETECTION OF EXPLOSIVE GASES IN INDUSTRIAL FACILITIES

Reducing risks associated with potential explosion of explosive gases may be achieved by using gas detection systems. Their task is to detect hazards to enable appropriate operator or system response in order to reduce the risk eg. through appropriate warning and ventilation. These systems must meet industry standards, and under certain conditions they should be designed in accordance with the requirements of functional safety. Through analysis and risk assessment of explosion risk it can be achieved a significant improvement in the field of safety through the proper selection of explosive gas detection systems, using the appropriate methodology. The article is an example of risk analysis and equipment selection of gas detection system, including determining the required SIL and verification that level for given detection system.

**Keywords:** risk of explosion, gas detection, reliability, functional safety.

### 4. BIBLIOGRAFIA

1. Dyrektywa Unii Europejskiej w sprawie minimalnych wymagań bezpieczeństwa i ochrony zdrowia dla pracowników narażonych na ryzyko spowodowane przez atmosfery stwarzające zagrożenie wybuchem nr. 1999/92/WE (ATEX USERS), 1999
2. Reason J., The Contribution of Latent Human Failures to the Breakdown of Complex Systems. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. 1990;
3. Markowski A. S., Zapobieganie stratom w przemyśle, Cz. III Zarządzanie Bezpieczeństwem Procesowym, Politechnika Łódzka, Łódź 2000;
4. Markowski A. S., Instrukcja obsługi pakietu ExAWZ, Katedra Inżynierii Bezpieczeństwa Pracy Politechniki Łódzkiej, Łódź, 2011 r.;
5. Polska Norma PN-EN 60079-10-1: 2016-2 Atmosfery wybuchowe. Część 10-1: Klasyfikacja przestrzeni – Gazowe atmosfery wybuchowe (oryg.).
6. Polska Norma PN-EN 15233:2009 Metodyka oceny bezpieczeństwa funkcjonalnego systemów ochronnych do przestrzeni zagrożonych wybuchem.
7. Polska Norma PN-EN 50402:2007 Elektryczne przyrządy do wykrywania i pomiaru gazów palnych lub toksycznych oraz par i tlenu – Wymagania dotyczące bezpieczeństwa funkcjonalnego stacjonarnych systemów detekcji gazów
8. Kosmowski K. T., monografia Zarządzanie Bezpieczeństwem Funkcjonalnym, Fundacja Rozwoju UG, Gdańsk 2004;
9. Kosmowski K. T., monography Functional Safety Management In Critical Systems Fundacja Rozwoju UG, Gdańsk 2007;
10. Kosmowski K. T., Functional safety and reliability analysis methodology for hazardous industrial plants, Gdańsk University of Technology, Gdańsk 2013;
11. Kosmowski K. T., monografia, Podstawy Bezpieczeństwa Funkcjonalnego, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2015;
12. Dane niezawodnościowe oparciu o oprogramowanie exSILentia Version 3.3.0.903, aktualizacja na dzień 19.12.2014r.
13. Rogala I., Podstawy Bezpieczeństwa Funkcjonalnego, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej s. 223-233, Gdańsk 2015;
14. Rogala I., Dokument Zabezpieczenia Przed Wybuchem, weryfikacja i aktualizacja, Magazyn Ex nr. 3/2012 (27), Gdańsk 2012