DOI: 10.15199/17.2025.12.6

Bezpieczeństwo procesów

Safety of processes

Wojciech Kramarek*)

Słowa kluczowe: *Proces, bezpieczeństwo procesu, systemy i układ bezpieczeństwa, układy sterowania, normowanie międzynarodowe i europejskie, dyrektywy Seveso, Inspekcja ochrony środowiska, normy 61508 oraz 61511*

Streszczenie
Unia Europejska uznaje bezpieczeństwo ludzkie w środowisku pracy jako główny priorytet. Aby zmniejszyć udział wypadków w pracy , EU wydała szereg aktów prawnych powiązanych z zagadnieniami bezpiecznej pracy maszyn i instalacji. Uchwalone przepisy wymagają projektowania, wyprodukowania i użytkowania na terenie EU tylko bezpiecznych obiektów technicznych, nie zagrażających ludziom oraz środowisku.
Obiekty techniczne, ze względu na potencjalne zagrożenia, muszą być zabezpieczone układami bezpieczeństwa, niezależnymi od układów sterujących produkcją. Układy te w sytuacjach zagrożeń ludzi i obiektów technicznych powinny zacząć działać i doprowadzić do zminimalizowania wytworzonego ryzyka. Układy bezpieczeństwa mogą w pewnych sytuacjach okazać się zawodne i nie zadziałać prawidłowo. Stopień niezawodności ich działania można zwiększyć przez odpowiednią rozbudowę tych układów. Poziom rozbudowy układów ,odpowiedzialnych za bezpieczeństwo (SIS) ,zależy od poziomu ryzyka tworzonego przez obiekty. Im większe zagrożenia tym musi być większa niezawodność systemów bezpieczeństwa oraz lepiej rozbudowane poziomy ochronne.

Keywords: *Process, safety of process, safety control, control systems , international and Europeans standards, Seveso directives, Inspection of environmental protection,Standards 61508 and 61511*

Abstract
The European Union recognizes human safety in the workplace as a top priority. To reduce the incidence of occupational accidents, the EU has issued a number of legal acts related to the safe operation of machinery and installations. The regulations require the design, production, and use within the EU of only safe technical facilities that do not pose a threat to people or the environment.
Due to potential threats, technical facilities must be protected by safety systems independent of production control systems. These systems should be activated in situations where people or technical facilities are at risk, minimizing the resulting risk. Safety systems may, in certain situations, prove unreliable and fail to function properly. Their operational reliability can be improved by appropriately upgrading these systems. The level of development of safety systems (SIS) depends on the level of risk posed by the facilities. The greater the risks, the greater the reliability of safety systems and the more extensive the protection levels required.

1. Wprowadzenie

Definicja procesu

Proces produkcyjny lub proces przemysłowy to zespół działań mających na celu przekształcenie surowców i półproduktów w wyroby gotowe. Przekształcenia w procesie produkcyjnym występują w następującym porządku:

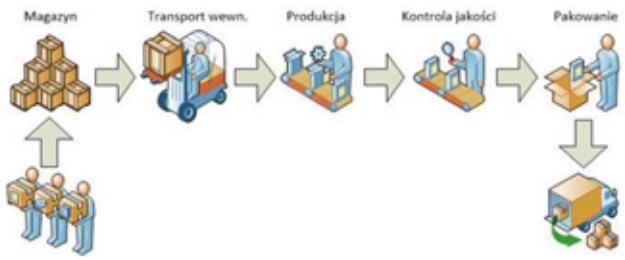
- surowiec – materiał – produkcja w toku – półfabrykat – produkt gotowy.

Do cyklu procesu produkcyjnego są zaliczane:

- proces technologiczny (proces podstawowy),
- procesy pomocnicze,
- kontrola jakości,
- magazynowanie,
- transport wewnętrzny.

Według większości autorów, zajmujących się procesami, transport produktów poza przedsiębiorstwem i ich dystrybucja nie należą do procesu produkcji.

Produktem może być paliwo płynne lub gazowe, czynniki chemiczne (farby, rozpuszczalniki, nawozy), produkty spożywcze typu alkohol, przetworzone mleko, itp. Zespół urządzeń produkcyjnych, służących do przeprowadzenia procesu technologicznego, współdziałających ze sobą według określonego planu, nazywa się układem technologicznym. Ważny udział w procesie mają także urządzenia pomocnicze, służące do transportu materiałów i do ich przechowywania, a także urządzenia, za pomocą których kieruje się przebiegiem procesu. Kompletna aparatura złożona z urządzeń produkcyjnych i pomocniczych, wykonująca określony program produkcyjny, nazywa się instalacją produkcyjną lub obiektem procesowym.



Rys. 1 Cykl produkcyjny
Fig.1 Production cycle [18]

* **Wojciech Kramarek**, Państwowa Akademia Nauk Stosowanych im. Ignacego Mościckiego w Ciechanowie, e-mail: wojciech.kramarek@pansim.edu.pl

Rys. 2 Zakład wytwórczy wodoru
Fig.2 Hydrogen production plant [9]

2.Bezpieczeństwo maszyn i instalacji

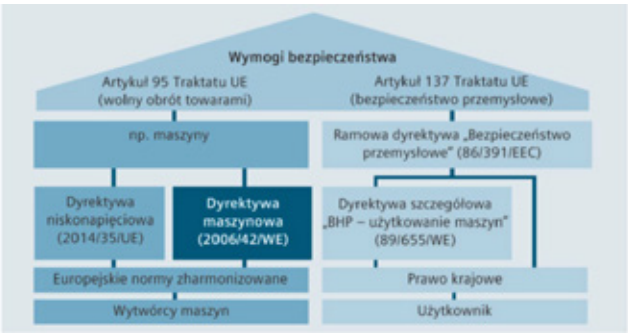
Problem bezpiecznej pracy instalacji oraz maszyn jest postrzegany przez Unię Europejską jako podstawowa kwestia społeczna i przemysłowa. Jest ona szczególnie ważna w przypadku dużych i złożonych systemów technicznych, takich jak transport powietrzny czy kolejowy, przemysł zbrojeniowy, chemiczny albo energetyka jądrowa. Systemy te są najczęściej określane jako systemy procesowe.

Bezpieczeństwo procesowe jest to ogół zagadnień dotyczących bezpieczeństwa pracy instalacji przemysłowej w sektorze przemysłu procesowego (chemia, petrochemia, energetyka, gazownictwo). Wysokie temperatury i ciśnienia, palne i toksyczne materiały typowe dla tych gałęzi przemysłowych, przyczyniają się do możliwości powstawania groźnych zagrożeń. . Niezawodność elementów i systemów odpowiedzialnych za prowadzenie procesu wpływają na jego poprawną pracę oraz bezpieczeństwo.

Według Wikipedii Bezpieczeństwo Procesowe to interdyscyplinarna dziedzina inżynierii skupiająca się na badaniu, zapobieganiu i zarządzaniu pożarami , eksplozjami i awariami chemicznymi na dużą skalę (takimi jak chmury toksycznych gazów) w zakładach przetwórczych lub innych obiektach zajmujących się materiałami niebezpiecznymi , takimi jak rafinerie oraz instalacje do wydobycia gazu i ropy (na lądzie i na morzu). Bezpieczeństwo procesowe zatem wiąże się z zapobieganiem, kontrolą, łagodzeniem i odzyskiem niezamierzonych uwolnień materiałów niebezpiecznych, które mogą mieć poważny wpływ na ludzi (na terenie zakładu i poza nim), zakład i/lub środowisko. [1] [2] [3]

Zagadnienia bezpieczeństwa procesowego mogą być podzielone na dwa działy:

- minimalizacja ryzyka i zagrożeń procesowych na etapie projektu i powstawania instalacji technologicznych objęte wymaganiami artykułu 95 Traktatu UE,
- zarządzanie zagrożeniami w trakcie pracy obiektu oraz zachowania kryzysowe i powypadkowe, objęte wymaganiami artykułu 137 Traktatu UE.



Rys. 3 Dwa kierunki działań w EU zapewniające bezpieczeństwo maszyn i procesów
Fig.3Two directions of action in the EU to ensure the safety of machines and processes [14]

Aktami prawnymi, obowiązującymi w Europie i związanymi z zagadnieniami bezpieczeństwa technicznego, są dyrektywy, obowiązujące we wszystkich krajach członkowskich. Przez długi okres jednym z podstawowych aktów prawnych, regulującym wymagania bezpieczeństwa maszyn i instalacji, była Dyrektywa Maszynowa 2006/42/EC). W czerwcu 2023r. przez Komisję Europejską wprowadzony został akt prawny Machinery Regulation (EU) 2023/1230 , który zastępuje obecnie obowiązującą Dyrektywę Maszynową. Nowa regulacja musi zostać wprowadzona przez wszystkie kraje członkowskie EU do stycznia 2027 r.

Obowiązujące dyrektywy oraz normy europejskie, związane z bezpieczeństwem maszyn i instalacji, określają pewne reguły obowiązujące producentów maszyn oraz ich użytkowników.

Obowiązujące regulacje prawne, zgodnie z artykułem 95 Traktatu Unii, dotyczą projektantów I wykonawców maszyn oraz instalacji. Producent maszyny lub instalacji ma obowiązek zapewnienia odbiorców, że wyrób wprowadzany przez niego na rynek Wspólnoty Europejskiej, został zaprojektowany i wytworzony zgodnie z postanowieniami odpowiednich dyrektyw nowego podejścia. Wszystkie maszyny, poszczególne ich rodzaje lub instalacje spełniać muszą Zasadnicze wymagania bezpieczeństwa, zawarte w Załącznikach do poszczególnych dyrektyw.

Art. 217 Polskiego Kodeksu Pracy stanowi, że niedopuszczalne jest wyposażanie na obszarze Rzeczpospolitej Polskiej stanowisk pracy w maszyny i inne urządzenia techniczne, które nie spełniają wymagań dotyczących ich oceny zgodności z zasadniczymi wymaganiami bezpieczeństwa. Wymagania zasadnicze dotyczące bezpieczeństwa wyrobu są przedstawiane w dyrektywach, obejmujących duże grupy wyrobów w sposób ogólny.

Szczegóły techniczne ,związane ze zgodnością z wymaganiami zasadniczymi, zostały przedstawione w europejskich normach zharmonizowanych, które nie są obligatoryjne, ale godne polecenia do zastosowania.

Jeśli występuje zgodność wyrobu z wymaganiami norm zharmonizowanych, związanych z wyrobem, można przyjąć domniemanie spełnienia wymagań zasadniczych a tym samym zgodność z obowiązującymi dyrektywami.

Artykuł 113 Traktatu Unii mówi o zasadach użytkowania istniejących w obiektach maszyn i instalacji.

Bezpieczna eksploatacja maszyn, urządzeń, budynków i środków transportu obejmuje działania techniczne, administracyjne i kierownicze, których celem jest utrzymywanie ich w stanie gotowości do pełnienia wymaganej funkcji w sposób gwarantujący bezpieczeństwo użytkownikom (lub przywracanie do takiego stanu) oraz ich ochrona przed uszkodzeniem lub zniszczeniem. Przypisane do tego kierunku działań są tzw. dyrektywy społeczne, nazywane czasami narzędziowymi. Użytkownicy maszyn i instalacji mają obowiązek stosowania się do wymogów tych dyrektyw.

3. Katastrofy przemysłowe

Katastrofy przemysłowe zachodzą nagle, ale ich główne przyczyny zwykle są zależne od człowieka. Wraz z rozwojem skali produkcji są wykorzystywane oraz przewożone wielkie ilości niebezpiecznych materiałów, potrzebnych do funkcjonowania fabryk. W przypadku uszkodzenia obiektów magazynowych, produkcyjnych lub transportowych może dojść do samoczynnego uwolnienia toksycznych substancji – trucizn chemicznych, biologicznych lub promieniotwórczych. Rozpoczęta katastrofa może doprowadzić do skażenia terenów, uszkodzenia instalacji produkcyjnych, śmierci lub silnego zatrucia ludzi oraz zwierząt przebywających w rejonie zanieczyszczenia. Awarie są następstwem niewłaściwego użytkowania instalacji i substancji przemysłowych, złego składowania odpadów oraz złego stanu technicznego urządzeń.

Rys. 4 Uszkodzenie rurociągu transportującego paliwo
Fig.4 Damage to the fuel pipeline [1]

Rys.6 Instalacja chemiczna w Bhopalu po wybuchu
Fig.6 Bhopal chemical plant after the explosion [10]

Przykłady katastrof w przemyśle procesowym.

Do najbardziej znanych katastrof są zaliczane:

- 1974 – awaria w zakładach chemicznych Nypro Ltd, we Flixborough, (Anglia), zginęło 28 osób, poważnie zranionych zostało 36,

Rys. 5 Fabryka chemiczna w miejscowości Flixborough (Anglia) po wybuchu w lipcu 1974 r.
Fig.5 The chemical factory in Flixborough (England) after the explosion in July 1974. [2]

- 1976 – katastrofa w Seveso (Włochy) w zakładach ICMESA, znajdujących się w Meda, na przedmieściu Seveso,
- 1984 – katastrofa w Bhopalu (Indie) w zakładach Union Carbide. Według władz rządowych stanu Madhya Pradesh, w wyniku katastrofy zmarło 3787 osób, a kilka tysięcy doznało trwałego uszczerbku na zdrowiu. Dane BBC mówią o około 3 tysiącach osób zmarłych natychmiast i 15 tysiącach w wyniku powikłań po kontakcie z uwolnioną substancją. Według organizacji Greenpeace zmarło 20 tysięcy osób. Obecnie szacuje się, iż zmarło 15 tysięcy osób, a 560 tysięcy zostało poszkodowanych w wyniku katastrofy.
- 1986 – wybuch w reaktorze w elektrowni jądrowej w Czarnobylu (Związek Radziecki), raport Komitetu Naukowego ONZ ds. Skutków Promieniowania Atomowego stwierdza, że 134 pracowników elektrowni jądrowej i członków ekip ratowniczych było narażonych na działanie bardzo wysokich dawek promieniowania jonizującego, po których rozwinęła się ostra choroba popromienna. 28 z nich zmarło w wyniku napromieniowania, a 2 od poparzeń. Wielu ludzi biorących udział w akcji zabezpieczenia reaktora zginęło podczas towarzyszących akcji wypadków. Ilość zgonów spowodowanych zwiększonymi dawkami napromieniowania nie jest podawana.
- 1986 – awaria w zakładach chemicznych Sandoz (Szwajcaria) skutkuje zatruciem Renu związkami fosforu i rtęci na całej długości rzeki,
- 2000 – wybuch w fabryce fajerwerków w Enschede w Holandii spowodował śmierć 23 osób,
- 2001 – wybuch w zakładach chemicznych AZF w Tuluzie spowodował śmierć 31 osób i zranił 2,5 tys. osób.

Katastrofa we Flixborough uświadomiła wielu krajom konieczność opracowania i wdrożenia przepisów prawnych, przeciwdziałających występującym w zakładach procesowych zagrożeniom. Zagadnienia zapobiegania awariom, analizy ryzyka i zagrożeń stały się przedmiotem zainteresowania władz oraz środowisk inżynierskich i naukowych najpierw w Wielkiej Brytanii a później w innych rozwiniętych technologicznie krajach. Powołano specjalne komitety doradcze. Rozwinięto prace organizacyjne i badawcze z tej dziedziny, doprowadzono do uchwalenia aktów prawnych dotyczących zarządzania zagrożeniami awarii przemysłowych.

Awaria w Seveso ,Włochy, była bezpośrednim impulsem do opracowania, i przyjęcia w 1982 r. przez Wspólnotę Europejską Dyrektywy 82/501/EWG dotyczącej bezpieczeństwa obiektów procesowych. W latach następnych przeprowadzono modyfikacje tej dyrektywy i powstały Dyrektywy Seveso II oraz Seveso III.

4. Dokumenty i przepisy związane z zagadnieniami bezpieczeństwa

W lutym 1996 r. American National Standards Institute (ANSI) opublikował normę ANSI/ISA S84.01-1996, "Application of safety instrumented system for the process industries" (Zastosowanie systemów bezpieczeństwa w przemyśle procesowym).

Norma weszła w życie w USA w marcu 1997r. Jako norma ANSI została wprowadzona w życie w dwóch programach OSHA (Occupational Safety and Health Administration – Agencji Bezpieczeństwa i Zdrowia w Pracy). Programy są zgodne z normami takich organizacji jak: American Society of Mechanical Engineers, American Petroleum Institute, American National Standards Institute, National Fire Protection Association, and American Society for Testing and Mater**ials.**

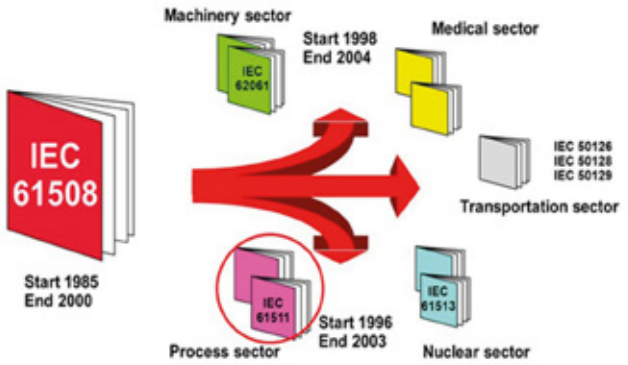
W 1998 r. europejska IEC (International Electrotechnical Commission z siedzibą w Genewie) opracowała dokument 61508, zatytułowany "Funkcjonalne bezpieczeństwo elektrycznych /elektronicznych /programowalnych elektronicznych systemów bezpieczeństwa". Opublikowany dokument ustalał zasady projektowania systemów bezpieczeństwa, zarówno dotyczące sprzętu jak i oprogramowania. Dokument, poza zaleceniami dotyczącymi projektowania systemów,

opisuje sposoby i metody testowania obiektów, zarówno na etapie odbioru jak i w czasie pracy produkcyjnej. Norma ta stała się podstawowym dokumentem do opracowania następnych standardów. Trzy kolejne normy związane z zagadnieniami bezpieczeństwa to IEC 61511 dotycząca procesów, IEC 61513 dotycząca energetyki jądrowej oraz IEC 62061 dotycząca produkcji i wyposażenia.

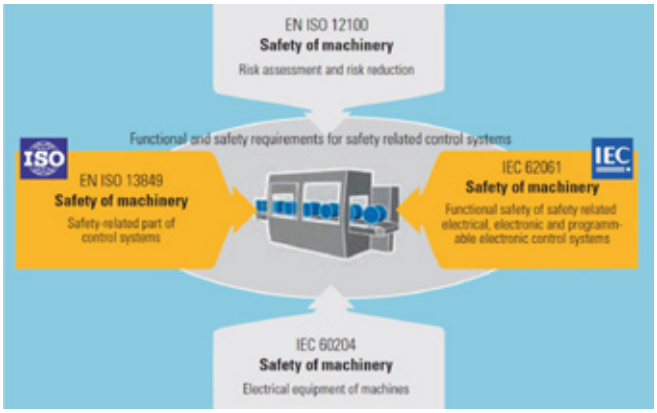
Najważniejszą normą, związaną z zagadnieniami bezpieczeństwa procesowego, jest IEC 61511. Jest to techniczna norma ustalająca inżynierskie zasady, które gwarantują bezpieczeństwo procesów, dzięki stosowaniu systemów odpowiedzialnych za bezpieczeństwo przemysłowych procesów. Systemy takie, jak było wspomniane wcześniej, są określane jako SIS-Safety Instrumented Systems. Norma została zatytułowana: "Functional safety – Safety instrumented systems for the process industry sector".

SIS to specjalnie zaprojektowane systemy bezpieczeństwa, niezależne od automatyki sterującej przebiegiem procesu, zawierające elementy i zespoły automatyki oraz oprogramowanie. Funkcjonują one przez cały czas w trybie bezpośredniej łączności z procesem wytwórczym (przetwórczym), monitorując parametry procesu wpływające na bezpieczeństwo. Zadaniem tych systemów bezpieczeństwa jest podejmowanie natychmiastowych działań, w celu usunięcia skutków wykrytych przez siebie niebezpiecznych zdarzeń, zachodzących w procesie. IEC 61511 jest obecnie podstawową normą służącą do projektowania systemów bezpieczeństwa w sektorze procesowym

Europejska komisja normalizacyjna, CENELEC (Europejski Komitet Normalizacyjny Elektrotechniki z siedzibą w Brukseli) przyjęła opracowany dokument IEC 61511 jako normę EN 61511. Oznacza to, że w każdym z krajów członkowskich Unii Europejskiej przyjęta norma jest publikowana jako norma krajowa. Tekst normy krajowej odpowiada dokładnie zawartości normy europejskiej. IEC 61511, zawiera wymagania dotyczące stosowania SIS od rozpoczęcia projektu do jego ukończenia. Zawartość normy opisuje początkową koncepcję układu bezpieczeństwa, wymagania projektowe, wdrożenie, okres działania, demontaż i utylizację.



Rys. 7 Główne akty prawne związane z bezpieczeństwem obowiązujące w EU
Fig.7 The main security-related legal acts in force in the EU [8]



Rys. 8 Akty prawne związane z sektorem maszyn obowiązujące w EU
Fig.8 Legal acts related to the machinery sector in force in the EU [8]

4. Przyczyny katastrof w przemyśle procesowym

Katastrofy w przemyśle procesowym są stosunkowo rzadkie, natomiast najczęściej powodują śmierć wielu osób oraz bardzo wielkie zniszczenia materialne.

Katastrofy są powodowane przez:

a) przyczyny techniczne:
   - » awarie techniczne elementów i systemów związanych z procesem produkcyjnym oraz bezpieczeństwem,
   - » uszkodzenia sensorów, elementów automatyki, maszyn i instalacji procesowych,
   - » obsługowe błędy ludzkie,
   - » zaniki zasilania energetycznego,

b) katastrofy środowiskowe:
   - » trzęsienia ziemi,
   - » powodzie,
   - » wichury i huragany,

c) wypadki w trakcie transportu i magazynowania niebezpiecznych materiałów,

d) sabotaże i ataki terrorystyczne,

e) niepokoje społeczne.

Rys. 9 Wypadek w trakcie transportu chemikaliów [11]
Fig.9 Accident during the transport of chemicals

5. Systemy bezpieczeństwa w projektowanych zakładach

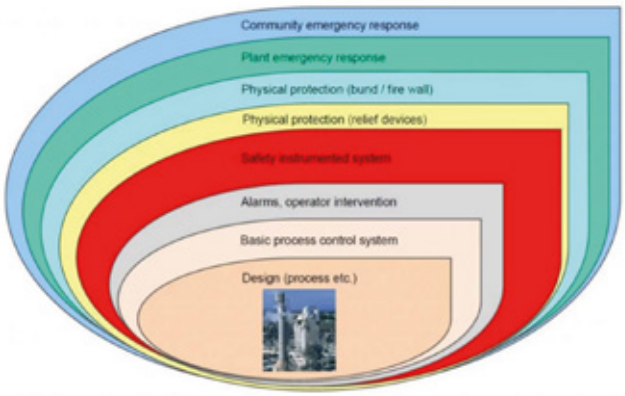
Zagadnienia bezpieczeństwa procesowego mogą być podzielone na dwa działy:

1. minimalizacja ryzyka i zagrożeń procesowych,
2. zarządzanie zagrożeniami oraz zachowania kryzysowe i powypadkowe, mające prowadzić do minimalizacja skutków w razie zaistnienia awarii przemysłowej.

Bezpieczeństwo procesowe powinno być w pierwszej kolejności nastawione na niedopuszczenie do wystąpienia zagrożeń. Ponieważ stosowane zabezpieczenia techniczne nie gwarantują pełnego bezpieczeństwa, w procesach stwarzających zagrożenia dla społeczności lokalnych wymagane jest stosowanie wielowarstwowych poziomów zabezpieczeń. Jeden poziom zabezpieczeń nie daje gwarancji zapewnienia bezpieczeństwa procesowi lub personelowi, jeśli pojawia się niebezpieczny incydent. Z tego powodu bezpieczeństwo trzeba zapewnić na wielu poziomach zabezpieczeń. Jeśli pomimo zastosowanych zabezpieczeń nastąpiła katastrofa, wówczas należy rozpocząć realizację planu zachowań awaryjnych na terenie zakładu oraz poza terenem a także podjąć działania minimalizujące powstałe straty.

Pierwszy poziom zabezpieczeń jest związany z prawidłowym opracowaniem projektu planowanego procesu. Projekt procesu oraz instalacji procesowej powinien być oparty o dobrą praktykę inżynierską czyli zgodność danego projektu oraz sposobu prowadzenia produkcji z obowiązującymi przepisami, standardami, poradnikami oraz sposobami postępowania. Dotyczy to w szczególności :

- ustaw i rozporządzeń krajowych,
- standardów ogólnych stosujących się do różnych branż przemysłowych,



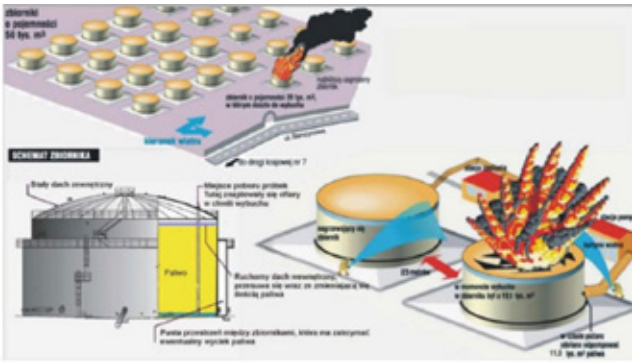
Rys. 10 Wielowarstwowe poziomy zabezpieczeń w procesach : process value – (projekt procesu), process control layer-system sterowania procesem, operator intervention-alarmy i działania obsługi, emergency shutdown system lub safety instrumented system – system odpowiedzialny za bezpieczeństwo, active protection layer (relief devices)-urządzenia bezpieczeństwa, (kurtyny wodne, baseny bezpieczeństwa, zapory), plant and emergency response – zakładowy oraz środowiskowy system ratowniczy

Fig 10 Multi-layered security levels in processes [8]

- standardów Europejskich oraz standardów rozwiniętych krajów przemysłowych.

Na etapie projektowania, zwłaszcza przy tworzeniu projektu obiektów mogących wytworzyć poważne zagrożenia dla pracowników i ludności, należy zastosować zasady ograniczonego zaufania w odniesieniu ,zarówno do systemów technicznych, jak i procedur obsługowych. Jako przykłady takiego postępowania można wymienić stosowanie zwiększonych naddatków grubości materiałów konstrukcyjnych, stosowanie materiałów o wyższej wytrzymałości w stosunku do wynikającej z obliczeń, itp..

Należy również w projektowaniu instalacji przemysłowych przyjąć zasady bezpiecznych odległości, eliminujących efekt domina i zewnętrznych oddziaływań.

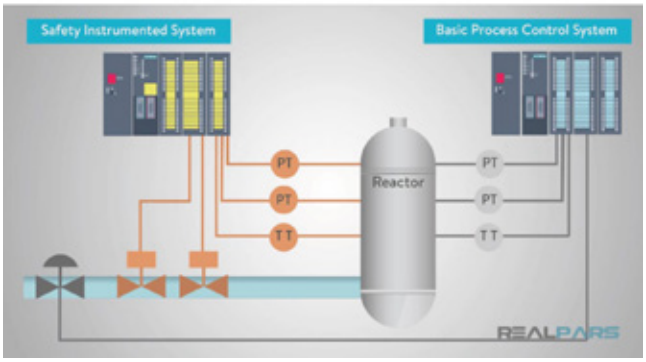


Rys. 11 Ilustracja efektu domina

Fig.11Domino effect illustration [3]

Druga warstwa zabezpieczeń, często określana w literaturze jako BPCS (Basic Proces Control System), to układ sterujący oraz procedury obsługowe związane z procesem wytwórczym. Ta warstwa odpowiada za wielkość i jakość produkcji. Systemy sterujące i procedury obsługowe mają zapewnić utrzymanie parametrów technicznych (ciśnienia, temperatury, poziomów cieczy, szybkości prowadzenia procesu, itp.) na prawidłowym poziomie. Przy prawidłowym działaniu elementów aparatury przemysłowej, zadanie prowadzenia poprawności procesu przez BPCS jest zapewnione. W sytuacji uszkodzenia chociaż jednego z elementów BPCS, układ sterujący nie daje możliwości jego poprawnego przebiegu.

Trzeci poziom zabezpieczeń dotyczy interwencji podejmowanych przez operatorów, po otrzymaniu sygnałów o przekroczeniu pewnych parametrów krytycznych prowadzonego procesu. Stan taki jest stanem obecnym, w przyszłości te funkcje nadzorcze zostaną przejęte przez



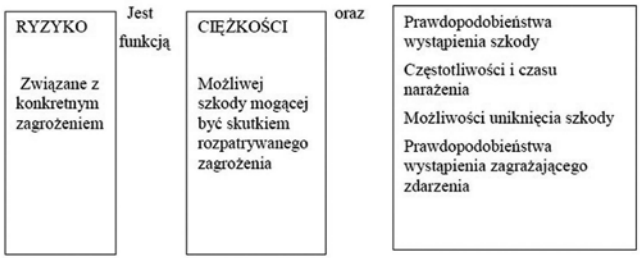
Rys. 12 Przykład układu sterującego procesem złożonego z BPCS oraz SIS

Fig.12 Example of a process control system consisting of a BPCS and a SIS [10]

systemy automatycznego nadzoru. Nie można zakładać, że reakcja ze strony operatorów zawsze będzie prawidłowa. Ponieważ sytuacje awaryjne występują rzadko, operatorzy mogą zakładać, że alarmy są nieprawidłowe. W przypadku wystąpienia dużej ilości sygnałów awaryjnych równocześnie, operatorzy mogą podejmować niewłaściwe działania, zwłaszcza dotyczące kolejności interwencji.

Czwarty poziom zabezpieczeń dotyczy automatycznych systemów bezpieczeństwa SIS.

Projekt instalacji odpowiedzialnej za bezpieczeństwo musi być poprzedzony, zgodnie z wymaganiami Dyrektywy Maszynowej, oceną ryzyka projektowanego obiektu. Możliwe ryzyko może być określone przy wykorzystaniu różnych stosowanych metoda. Przy ocenie ryzyka w procesach najczęściej jest stosowana metoda HAZOP (HAZard and OPerability study). Popularną metodą oceny ryzyka procesowego, również często stosowaną, jest LOPA (Layers of Protection Analysis). Poziom ryzyka musi być określony dla każdego istniejącego zagrożenia w obiekcie. Ryzyko to narażenie człowieka w procesie pracy na działanie czynników niebezpiecznych lub szkodliwych dla zdrowia. Ryzyko zawodowe definiuje się jako funkcję ciężkości możliwej szkody oraz prawdopodobieństwa wystąpienia tej szkody.



Rys. 13 Ryzyko zawodowe (hazard) jako funkcja ciężkości szkody i ekspozycji

Fig.13 Occupational risk (hazard) as a function of injury severity and exposure [10]

Po określeniu poziomu ryzyka analiza ryzyka procesowego ((PHA) process hazard study) określi niezbędny poziom redukcji ryzyka a tym samym zdefiniuje wymagany dla procesu poziom SIL (safety inegrity level – niezawodność systemu bezpieczeństwa). Dokumentacja dotycząca oceny ryzyka przedstawia zastosowaną procedurę i uzyskane wyniki a także następujące informacje:

- dane maszyny, (parametry, zamierzone zastosowanie itp.),
- przyjęte założenia, takie jak obciążenia, naprężenia dopuszczalne, współczynniki bezpieczeństwa),
- zidentyfikowane zagrożenia i niebezpieczne, brane pod uwagę, sytuacje,
- dane, takie jak historie wypadków i awarii w porównywalnych maszynach i źródła tych danych,
- opis zastosowanych środków ochronnych,
- opis zadań możliwych do zrealizowania przy pomocy tych środków ochronnych,

- ryzyko resztkowe,
- wszystkie dokumenty opracowane podczas oceny ryzyka.

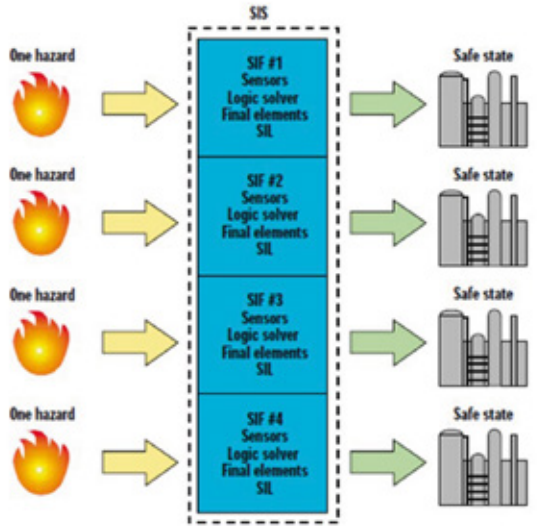
System sterowania związany z bezpieczeństwem (SIS, SRCS — safety related control system) jest tą częścią systemu sterowania maszyny, której zadaniem jest zapobieganie sytuacjom zagrożenia. Może to być osobny system dedykowany lub zintegrowany ze standardowym systemem sterowania. Aktualnie ten system jest uważany za największego gwaranta bezpieczeństwa. SIS ma jednak określoną zawodność działania, może w pewnych sytuacjach nie zadziałać prawidłowo. Niezawodność tego systemy musi być dopasowana do ryzyka wytwarzanego przez obiekt.

System bezpieczeństwa, a dokładniej system nadzorujący bezpieczeństwo ma następujące zadania:

- nadzorować warunki pracy instalacji (procesu) a szczególnie parametry, których przekroczenie może prowadzić do powstania niebezpiecznej sytuacji,
- w przypadku powstania niebezpiecznej sytuacji (przekroczenie granicznych parametrów jak temperatura, ciśnienie, poziom czynnika, otwarcie osłon, itp.) rozpocząć działanie układu sterującego które zniweluje powstałe zagrożenie albo zminimalizuje skutki zagrożenia,
- nie dopuścić do wkroczenia człowieka w obszar zagrożeń.

Safety Instrumented Systems SIS (układy odpowiedzialne za bezpieczeństwo) mają za zadanie zabezpieczenie personelu, wyposażenia i środowiska przez zmniejszenie prawdopodobieństwa wypadku oraz przez zmniejszenie możliwej skali szkód w przypadku zaistnienia sytuacji awaryjnej.

SIS składa się najczęściej z kilku funkcji bezpieczeństwa (SIF – Safety Instrumented Function) zapewnianych przez różne elementy systemu.



Rys. 14 Relacje pomiędzy SIS a SIF
Fig.14 Relationship between SIS and SIF [8]

W Systemie bezpieczeństwa jego działanie zależy od trzech składników systemu:

- czujników przekazujących dane o stanie systemu, od stanu układu zasilającego oraz interfejsów i układów przekształcających,
- układu logicznego wytwarzającego odpowiednie sygnały wyjściowe, wraz z jego zasilaniem i systemem przekazywania danych,
- elementów wykonawczych jak zawory, styczniki, falowniki, elementy elektroniczne, realizujących wytworzone polecenia.

Nie wszystkie systemy bezpieczeństwa zapewniają taki sam poziom bezpieczeństwa. Pewne grupy układów bezpieczeństwa zapewniają wykonywanie poleceń związanych z bezpieczeństwem, tylko w przypadku prawidłowego działania wszystkich elementów składowych. Układy te są nieodporne na błędy elementów tworzących system odpowiedzialny za bezpieczeństwo. Istnieją także grupy układów sterujących, które potrafią realizować funkcje bezpieczeństwa, nawet w przypadku pojawienia się uszkodzeń części elementów tworzących system. Sytuacja taka jest

Rys. 15 Tor realizacji funkcji bezpieczeństwa SIF jako części składowej SIS
Fig.15 Track for implementing the SIF security function as a component of the SIS [8]

możliwa dzięki odpowiedniej rozbudowie układów odpowiedzialnych za bezpieczeństwo maszyny, procesu lub instalacji.

Systemy bezpieczeństw są dzielone na kategorie (poziomy) związane z ich przeznaczeniem oraz zdolnością zapewnienia działania funkcji bezpieczeństwa. Wiarygodność systemu jako układu bezpieczeństwa wyraża się poziomem nienaruszalności bezpieczeństwa SIL (Safety Integrity Level), który zależy od prawdopodobieństwa wystąpienia błędu wewnętrznego w czasie pracy systemu.

Poziom Nienaruszalności Bezpieczeństwa (Safety Integrity Level [SIL]: 1, 2, 3,4) został zdefiniowany przez normę EN 61511 wywodząca się od normy EN 61508. Im wyższy poziom SIL, tym zabezpieczenie przed możliwością wystąpienia awarii jest wyższe. W maszynach poziom niezawodności bezpieczeństwa układu odpowiedzialnego za bezpieczeństwo jest określany przez podanie poziomu PL (performance level). Występuje pięć poziomów PL-a, b, c, d i e. Poziomy te określa norma EN PN 13849. Wymagany poziom niezawodności działania układu bezpieczeństwa w maszynach można określić również zgodnie z norma EN 62061. Wybór stosowanej normy zależy od wiedzy i doświadczenia projektanta systemu.

Wymagany poziom SIL układu bezpieczeństwa należy dopasować do potencjalnych zagrożeń. Im wyższe ryzyko wypadku oraz jego konsekwencji tym musi być wyższy projektowany i wytworzony poziom SIL systemu bezpieczeństwa

W zależności od ocenionego zagrożenia wymagane jest zastosowanie układu bezpieczeństwa o następującym poziomie SIL:

SIL4 Ochrona przed katastroficznymi zagrożeniami dla społeczności lokalnej,
SIL3 Ochrona przed umiarkowanymi zagrożeniami dla pracowników i społeczności lokalnej,
SIL2 Zabezpieczenie sprzętu i produkcji.
Umiarkowany poziom ochrony zdrowia pracowników,
SIL1 Zabezpieczenie w umiarkowanym stopniu urządzeń i procesów.

Wymagany lub uzyskiwany poziom niezawodności działania układu odpowiadającego za bezpieczeństwo zależy od następujących parametrów:

1. HFT – hardware fault tolerance czyli architektura, struktura kanałowa, tolerancja defektów sprzętu,
2. PFHD – failure probability in the event of a request occurring : prawdopodobieństwo niezadziałania w przypadku przywołania, prawdopodobieństwo defektu niebezpiecznego na godzinę,
3. SFF – proportion of safe faults or safe failures: udział uszkodzeń bezpiecznych,
4. T1-interwał testów sprawdzających, T2 – interwał testów diagnostycznych,
5. β-podatność na wspólną przyczynę defektów,
6. DC-pokrycie diagnostyczne,
7. T proof – test interval for the entire safety system : okresy testowania systemu bezpieczeństwa.

Należy pamiętać, że układ sterowania bezpieczeństwem nie stanowi pełnej, wystarczającej ochrony dla obsługi i osób postronnych, które mogą się potencjalnie znaleźć w otoczeniu obiektu. Układ bezpieczeństwa zabezpiecza głównie przed zagrożeniami stwarzanymi przez pracujące maszyny i instalacje a zwłaszcza ruchome elementy oraz odpowiada za nieprzekraczanie pewnych parametrów krytycznych procesów objętych monitoringiem. Układ bezpieczeństwa nie zabezpiecza przed zagrożeniami wynikającymi z zastosowania w maszynach pewnych mediów nie

objętych nadzorem jak sprężone powietrze, płyny pod ciśnieniem, cyrkulujące niebezpieczne gazy, para wodna o wysokiej temperaturze, pękające elementy korpusów czy rurociągów, itp.. Bezpieczeństwo tych obiektów można zwiększyć przez prawidłowy projekt konstrukcyjny, zabezpieczenie prawidłowego wykonania, opracowanie odpowiednich procedur obsługi i postępowania personelu.

Poziomy zabezpieczeń dla sytuacji awaryjnych

Przedstawione powyżej poziomy zabezpieczeń mają na celu zapobieżeniu powstaniu sytuacji awaryjnej. Następne poziomy zabezpieczeń są uruchamiane w stanach awaryjnych, gdy poprzednie systemy zabezpieczeń nie potrafiły zatrzymać rozwoju sytuacji niebezpiecznych. Te poziomy zabezpieczeń mają działać jako bariera służąca do ograniczenia i łagodzenia skutków wytworzonego zagrożenia.

Do piątego poziomu zabezpieczeń przedstawionego na rys.9. są zaliczane te urządzenia, które nie potrafią zatrzymać rozwoju sytuacji awaryjnych, ale mogą ograniczyć ich skutki. Najczęściej są tutaj wymieniane membrany bezpieczeństwa lub zawory ciśnieniowe. Uniemożliwiają one wzrost ciśnienia mogącego zniszczyć zbiorniki lub rurociągi ale powodują wypływ niebezpiecznego czynnika do atmosfery. Po zadziałaniu tych elementów na ogół są potrzebne działania serwisowe, niemożliwy jest szybki powrót typu reset do sytuacji wyjściowej.

W przemyśle chemicznym często są również stosowane tzw. emergency vent scrubbers czyli systemy pochłaniające niebezpieczne, toksyczne gazy oraz tzw. flare towers czyli wieże ognia, w których następuje spalanie tych gazów.

Następny poziom zabezpieczeń który powinien zadziałać po zaistnieniu awarii, to układy gaśnicze, zraszacze, kurtyny wodne itp.. Zaliczają się tutaj również alarmy, śluzy bezpieczeństwa, tamy, sadzawki bezpieczeństwa, do których mają spływać ciecze z uszkodzonego obiektu. Ten poziom zabezpieczeń nie zapobiega powstawaniu awarii, ma tylko minimalizować skutki jej zaistnienia.

Ostatni poziom zabezpieczeń dotyczy działań ratowniczych prowadzonych przez służby zakładowe oraz służby lokalne pozazakładowe. W obiektach procesowych wymagane jest istnienie służb awaryjnych.

Właściwe przygotowanie służb awaryjnych, opracowanie szybkiej i precyzyjnej informacji o miejscu i zakresie wystąpienia katastrofy przemysłowej to przedsięwzięcia sprzyjające zmniejszaniu zagrożeń oraz minimalizujące skutki. Do tych służb zaliczane są służby przeciwpożarowe, chemiczne, medyczne, sanitarne. Jednostki takie muszą istnieć w strukturze zakładu, muszą mieć opracowane procedury postępowania w sytuacjach awaryjnych. Poprawność działania tych służb, stopień przygotowania personelu, szybkość działania zadecyduje o poprawności działań ratowniczych

Podsumowanie

Unia Europejska jako jeden ze swoich priorytetów uznaje bezpieczeństwo ludzkie w środowisku pracy. Aby minimalizować udział wypadków w pracy oraz w jego otoczeniu EU wydała szereg aktów

Rys. 16 Spalanie gazów z platformy wiertniczej
Fig.16 Burning off gases from an oil platform [4]

Rys. 17 Zakładowe służby pożarnicze
Fig.17 Company fire services [1]

prawnych (dyrektywy, normy) powiązanych z zagadnieniami bezpiecznej pracy maszyn i instalacji. Uchwalone przepisy wymagają projektowania, wyprodukowania i użytkowania na terenie EU tylko bezpiecznych obiektów technicznych nie zagrażających ludziom oraz środowisku. Dyrektywy są obowiązujące we wszystkich krajach członkowskich EU, natomiast normy, które nie są obligatoryjne, mogą służyć jako wspaniała pomoc przy projektowaniu obiektów technicznych oraz ich użytkowaniu.

Obiekty techniczne, w zależności od zagrożenia które mogą wytworzyć , muszą być zabezpieczone układami bezpieczeństwa niezależnymi od układów sterujących produkcją. Układy te w sytuacjach zagrożeń ludzi i obiektów technicznych powinny zacząć działać i doprowadzić do zminimalizowania wytworzonego ryzyka. Układy bezpieczeństwa składające się z elementów automatyki przemysłowej mogą w pewnych sytuacjach okazać się zawodne i nie zadziałać prawidłowo. .Stopień niezawodności ich działania można zwiększyć przez odpowiednią rozbudowę tych układów. Poziom rozbudowy układów odpowiedzialnych za bezpieczeństwo (SIS) zależy od poziomu ryzyka tworzonego przez obiekty. Im większe zagrożenia tym musi być większa niezawodność systemów bezpieczeństwa oraz lepiej rozbudowane poziomy ochronne. Osoby w zakładach przemysłowych odpowiedzialne za wytworzenie bezpiecznych warunków pracy muszą zdawać sobie sprawę, że brak przestrzegania obowiązujących przepisów związanych z bezpieczną pracą maszyn i instalacji grozi im odpowiedzialnością cywilną oraz karną.

LITERATURA

[1] Bezpieczeństwo procesów przemysłowych] http://www.industrial-monitor.pl/informacje/bezpieczeństwo/3031
[2] Dyrektor ds. Zdrowia i Bezpieczeństwa, „Katastrofa we Flixborough: raport sądu śledczego", HMSO, ISBN 0113610750 , 1975.
[3] Dyrektywa Seveso II, art. 8 zatytułowany „Efekt domina".
[4] https://en.wikipedia.org/wiki/Gas_flare55https://pl.wikipedia.org/wiki/Proces_technologiczny
[5] https://www.pilz.com/pl-PL/services/machinery-safety/risk – assessmen
[6] http://www.endress.home.pl
[7] https://www.realpars.com/blog/safety-instrumented-system. What Is a Safety Instrumented System?
[8] http://www.schmersal. Industrial_safety_systems pl
[9] https://ammoniaknowhow.com/safety-instrumented-systems-sis-in-nitrogen-plants/
[10] Kramarek W. 2012. „Strategia bezpieczeństwa maszyn i instalacji", *Journal of machine engineering,* Wrocław.
[11] Kramarek W.2015." Konstrukcje wewnętrznie bezpieczne" *Mechanik*, nr 4/2015.
[12] Kramarek W., Szulewski P. 2012. „Systemy bezpieczeństwa współczesnych maszyn i urządzeń technologicznych" *Journal of machine engineering*, Wrocław.
[13] Kramarek W., Sałaciński T.2013. „Bezpieczeństwo elektrowni jądrowej (1)", *Przegląd Techniczny, polski*, 24-25/2013, ISSN 0137-8783, pp. 20-30.
[14] Kramarek W.2016." Zagadnienia bezpieczeństwa elektrowni jądrowej", *Mechanik*, (2):125-128 .
[15] Kramarek W.2016. ,, Proces, bezpieczeństwo procesu, systemy i układy bezpieczeństwa, układy sterowania" Przegląd spawalnictwa nr 6/2016,PL ISSN 0033-2364
[16] 15. Kramarek W., Śniegulska-Grądzka D. 2018." Bezpieczeństwo na wielu poziomach" Chemia przemysłowa, 5/2018 ISSN 1734-8013
[17] 16. Kramarek W., Śniegulska-Grądzka D.2018 „Niebezpieczna maszyna", *Chemia przemysłowa,* 3-4 2018 ISSN 1734-8013 .
[18] Product Bulletin 2019 57.1:001 July 2019 Fischer.com
[19] Leszek Czepirski, Technologia Chemiczna, wykład 1/2010, Akademia Górniczo –Hutnicza, Wydział Energetyki i Paliw (pol.)
[20] https://www.abhisam.com/what-is-a-safety-instrumented-functio