

# Konstrukcje wewnętrznie bezpieczne

## Inherently safe design

WOJCIECH KRAMAREK\*

DOI: 10.17814/mechanik.2015.5-6.205

Problem zapewnienia bezpiecznego środowiska pracy jest przez Unię Europejską traktowany jako priorytetowy. Osiągnięcie bezpieczeństwa jest możliwe przez stosowanie układów sterujących odpowiedzialnych za bezpieczeństwo lub odpowiednich procedur obsługowych. W przemyśle procesowym (chemicznym, rafineryjnym, energetyki jądrowej) bezpieczeństwo zapewniają przede wszystkim procesy i konstrukcje wewnętrznie bezpieczne. Uwzględnienie wymogów bezpieczeństwa jest obowiązkiem każdego projektanta. **SŁOWA KLUCZOWE:** bezpieczeństwo, systemy i układy bezpieczeństwa, konstrukcje wewnętrznie bezpieczne

*European Union considers the problem of safe work environment as the top priority. Workplace safety is reached by either designing special control systems, or by following appropriate safety procedures. In the material processing industries (e.g. chemical, oil refinery or nuclear power processes) high level of safety is achieved by designing inherently safe processes and machines. All designers are obliged to avoid accident hazards by the application of principles of inherent safety.*

**KEYWORDS:** safety, safety control systems, inherently safe designs

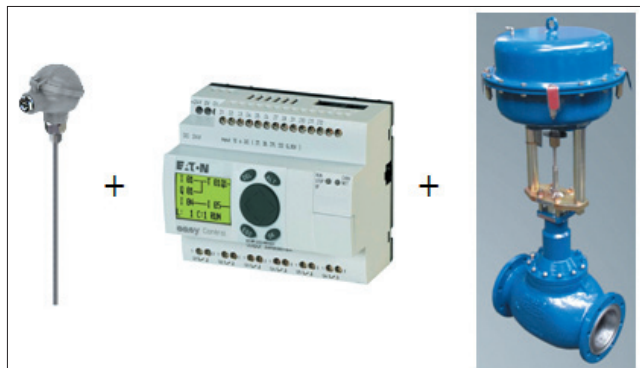
### Strategie bezpieczeństwa procesów i maszyn

Problem bezpiecznej, nietworzącej zagrożenia dla ludzi i środowiska pracy instalacji lub 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. Na obecnym etapie rozwoju techniki typowe rozwiązanie umożliwiające bezpieczną pracę systemów polega na zastosowaniu w nich **aktywnych układów bezpieczeństwa** o poziomach niezawodności działania dopasowanych do możliwych zagrożeń występujących w cyklu życia maszyny.

W aktywnych systemach bezpieczeństwa występują odpowiednie czujniki informujące o stanach procesu lub maszyny, układy logiczne analizujące bieżącą sytuację i podejmujące odpowiednie decyzje oraz zespoły wykonawcze realizujące te decyzje (rys. 1) [8].

Każdy z elementów tego łańcucha może zawieść, dlatego trzeba tworzyć układy odporne na uszkodzenia zespołów. Aktywne systemy bezpieczeństwa o małym współczynniku niezawodności nie gwarantują bezpiecznej pracy, natomiast te rozbudowane, o dużym współczynniku, są kosztowne.

Wyższy poziom bezpieczeństwa zapewniają pasywne systemy bezpieczeństwa, bardziej odporne na awarie, aczkolwiek trudniejsze do realizacji. W przypadkach zagrożenia elementy biernego układu bezpieczeństwa inicjują pewne działania, jak zmiana otwarć szczelin dławiących, zalanie układu czy wprowadzenie prętów kontrolnych



Rys. 1. Tor funkcji bezpieczeństwa złożony z czujnika, układu logicznego oraz elementu wykonawczego

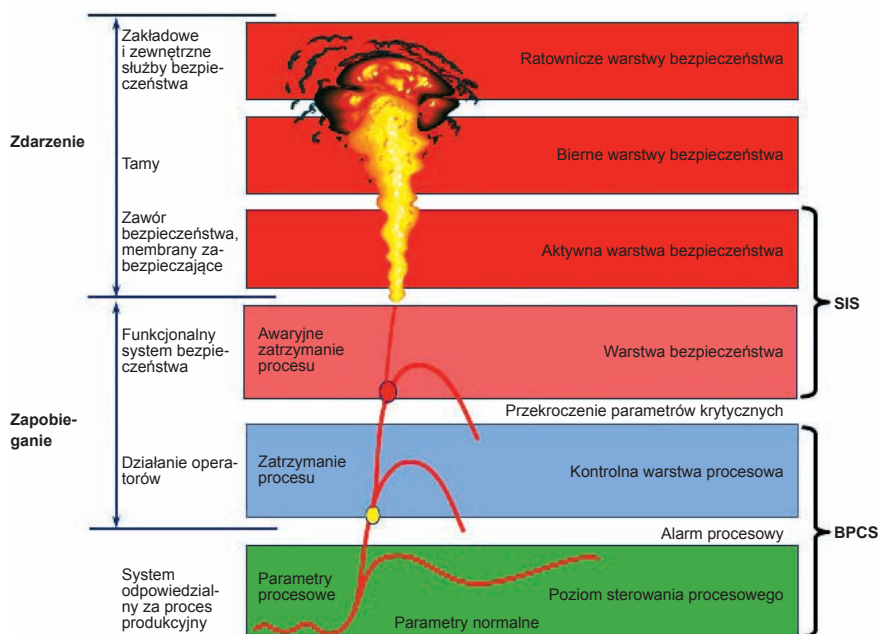
w rdzenie reaktorów. Takie systemy bezpieczeństwa są bardziej niezawodne w porównaniu z systemami aktywnymi.

Najnowsze kierunki rozwoju systemów bezpieczeństwa to tworzenie systemów wewnętrznie bezpiecznych określanych również **konstrukcjami wewnętrznie bezpiecznymi**.

Wzrost bezpieczeństwa ma również związek ze stosowaniem odpowiednich procedur. Strategie proceduralne obejmują przestrzeganie standardowych procedur, zasad bezpieczeństwa i szkolenia pracowników.

Ponieważ stosowane zabezpieczenia nie gwarantują pełnego bezpieczeństwa, w procesach stwarzających zagrożenia dla społeczności lokalnych wymagane jest ponadto stosowanie wielowarstwowych poziomów zabezpieczeń (rys. 2).

**Wielowarstwowe systemy zabezpieczeń** to układy gaśnicze, zraszacze, kurtyny wodne itp., które działają dopiero po wystąpieniu niebezpiecznego zdarzenia. Zaliczają się tutaj również alarmy, służby bezpieczeństwa, procedury oraz przygotowanie personelu zakładowego (służb chemicznych, medycznych, przeciwpożarowych) na wypadek zagrożenia.



Rys. 2. Wielowarstwowe poziomy zabezpieczeń (BPCS – basic process control system – układ sterujący odpowiedzialny za przebieg cyklu produkcyjnego, SIS – safety instrumented systems – systemy bezpieczeństwa)

\* Dr inż. Wojciech Kramarek (wojciech.kramarek@gmail.com) – Instytut Techniki Wytwarzania Politechniki Warszawskiej

## Konstrukcje wewnętrznie bezpieczne

W XX w. powstały cztery koncepcje podejścia do zagadnień bezpieczeństwa:

- do lat 30.: określić przyczynę zaistniałego wypadku oraz zidentyfikować osoby odpowiedzialne za wypadek,
- do lat 70.: znaleźć przyczynę wypadku oraz poprawić współdziałanie na linii człowiek–maszyna, przede wszystkim przez zwiększenie ilości informacji na temat stanu obiektu,
- w latach 80.: rozwijać metody oceny stwarzanego przez obiekt ryzyka oraz sposoby jego minimalizowania, głównie przez rozbudowę technicznych układów odpowiedzialnych za bezpieczeństwo,
- obecnie: tworzyć konstrukcje i systemy wewnętrznie bezpieczne, czyli układy nietworzące zagrożeń.

Konstrukcje wewnętrznie bezpieczne to rozwiązania, które są możliwe technicznie do zrealizowania oraz dopuszczalne z powodów ekonomicznych, a które minimalizują bądź usuwają zagrożenia dla zdrowia ludzkiego i środowiska związane z maszyną (procesem) [6].

Z konstrukcjami wewnętrznie bezpiecznymi wiążą się pewne zasady:

- bezpieczeństwo istnieje w sposób ciągły i nieusuwalny,
- bezpieczeństwo zostało wbudowane w proces lub maszynę, a nie zostało zwiększone na etapie późniejszym przez dodatkowe środki techniczne lub proceduralne,
- bezpieczeństwo polega na eliminacji lub minimalizacji ryzyka, a nie na kontroli zagrożenia,
- sposób projektowania powinien uwzględniać wszystkie fazy funkcjonowania maszyny (procesu), a nie ograniczać się do procesu produkcyjnego.

Zagadnienia konstrukcji wewnętrznie bezpiecznych są znane od wielu lat, choć nie od początku używano tego określenia. Przykładem takiego podejścia może być wynalezienie przez Alfreda Nobla dynamitu. Przedtem jako materiał wybuchowy stosowano nitroglicerynę, która jest niestabilna, silnie wybuchowa i bardzo wrażliwa na wstrząsy. Dodanie do niej ziemi okrzemkowej wytworzyło dynamit. Dynamit wydziela podczas wybuchu mniej energii niż czysta nitrogliceryna, jednakże jest znacznie odporniejszy na wstrząsy i uderzenia, a zatem znacznie bezpieczniejszy w użytkowaniu.

Termin konstrukcje wewnętrznie bezpieczne pojawił się w latach 70. XX w. podczas analizy przyczyn wypadku w zakładach chemicznych Nypro Ltd we Flixborough w Wielkiej Brytanii [11]. W fabryce tej produkowano głównie kaprolaktam, surowiec wykorzystywany do produkcji nylonu. W czasie produkcji z pękniętego rurociągu uwolniło się ok. 80 t gorącego ciekłego cykloheksanu, którego pary utworzyły



Rys. 3. Widok zakładów chemicznych Nypro Ltd w Flixborough po wybuchu [11]

z powietrzem wybuchową mieszaninę. W wyniku eksplozji o sile równoważnej wybuchowi 30 t trotylu śmierć poniosło 28 pracowników zakładu, a 36 osób odniosło obrażenia (rys. 3).

Trevor Kletz, brytyjski doradca ds. bezpieczeństwa, analizując tę katastrofę w swoim artykule „What you don't have, can't leak”, zakwestionował potrzebę wykorzystywania w cyklu produkcyjnym tak dużej ilości łatwopalnych oraz toksycznych materiałów. Według Kletza można było zwiększyć bezpieczeństwo procesu przez:

- zmniejszenie ilości stosowanych czynników,
- używanie jednorazowo mniejszej ilości materiałów,
- opracowanie nowej, bezpieczniejszej technologii produkcyjnej.

W późniejszym czasie dodano również kilka następujących zasad projektowych:

- projekt wyposażenia powinien uwzględniać najbardziej niekorzystne warunki mogące zaistnieć w przyszłości,
- projekt nie może prowadzić do wystąpienia błędów montażowych,
- układy sterujące powinny być możliwie proste i łatwe w obsłudze,
- należy doprowadzić do zgromadzenia pełnej informacji o procesie,
- nie wolno tworzyć sytuacji wywołujących efekt łańcuchowy.

## Koncepcja projektowania konstrukcji wewnętrznie bezpiecznych

Konstrukcje wewnętrznie bezpieczne powstają według pewnej filozofii wdrażanej w trakcie tworzenia procesu lub maszyny. Ten sposób myślenia został zapoczątkowany przez Kletza i powinien towarzyszyć cykлом eksploatacji urządzenia, wliczając w to wyprodukowanie, transport, przechowywanie, użycie oraz składowanie późniejszych odpadów [5].

Są cztery zasady postępowania związane z projektowaniem konstrukcji i procesów wewnętrznie bezpiecznych:

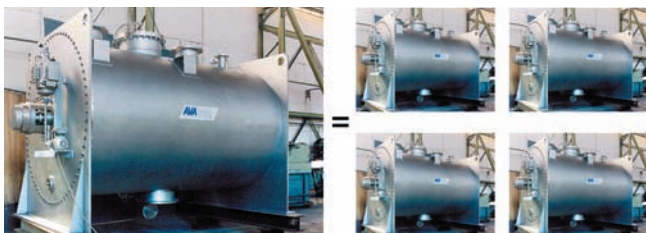
- zamiana,
- minimalizacja,
- umiarkowanie,
- upraszczanie.

**Zamiana** polega na wyeliminowaniu czynnika lub zastąpieniu go innym, mniej szkodliwym, powodującym mniejsze zagrożenie. Może stanowić także zmianę procesu produkcyjnego na taki, który nie wymaga niebezpiecznego czynnika. Przykładami strategii zamiany są próby zastąpienia w elektrowniach atomowych uranu torem, który jest mniej promieniotwórczy, albo produkcja farby na bazie wody zamiast na bazie łatwopalnego rozpuszczalnika (rys. 4).



Rys. 4. Czynniki robocze (olej mineralny) układów hydrauliki siłowej jako przykład substancji niebezpiecznej

**Minimalizacja** – zwana także intensyfikacją – polega na użyciu mniejszej ilości niebezpiecznych materiałów (w przypadku konieczności ich zastosowania), ewentualnie w większym stężeniu, co prowadzi do zmniejszenia gabarytów maszyn pracujących w niebezpiecznych warunkach, takich jak wysokie ciśnienie i temperatura. Minimalizacja umożliwia ograniczenie skutków awarii typu wyciek niebezpiecznych substancji, eksplozje czy pożary. Poprawia sprawność systemów bezpieczeństwa. Przykładem może być zmniejszenie wielkości zagrożenia wybuchem poprzez produkcję materiałów wybuchowych w mniejszych reaktorach, zawierających kilka galonów materiałów, zamiast w dużych wannach (rys. 5).



Rys. 5. Przykład minimalizacji układów chemicznych

**Umiarkowanie** – określane również tłumieniem, ograniczaniem – polega na użyciu materiałów niebezpiecznych w sposób ograniczający stopień ich szkodliwości (poprzez chłodzenie, rozcieńczanie, przetwarzanie w łagodniejszych warunkach) bądź użyciu materiałów w formie mniej szkodliwej czy wykorzystaniu obiektów, które minimalizują skutki uwolnienia niebezpiecznych substancji. Przykładem może być dostarczanie substancji łatwopalnych w postaci granulowanej, zmniejszającej ryzyko wybuchu, zamiast proszkowej, mogącej stworzyć mieszaninę wybuchową z powietrzem (rys. 6).



Rys. 6. Materiały granulowane jako przykład umiarkowania

**Upraszczenie** – inaczej: tolerancja na błędy – polega na eliminowaniu skomplikowania. Upraszczenie zmniejsza ryzyko wystąpienia błędów wynikających z czynnika ludzkiego oraz ogranicza stosowanie technicznych środków bezpieczeństwa (rys. 7).



Rys. 7. Przykład niewłaściwie zaprojektowanej instalacji wymagającej uproszczenia

## Sposoby oceny wyboru koncepcji rozwiązań konstrukcyjnych

Sposób oceny koncepcji rozwiązań konstrukcyjnych jest skomplikowany i uzależniony od lokalnego środowiska [1]. Brak w tej dziedzinie naukowej metody weryfikacji. Decyzja dotycząca wyboru koncepcji powinna uwzględniać m.in.:

- zagrożenia,
- prawdopodobieństwo porażki,
- konsekwencje dla narażonej ludności,
- oddziaływanie na środowisko,
- oddziaływanie na wszystkie sektory ekonomii,
- wykonalność techniczną i rentowność,
- obowiązujące przepisy.

## Podsumowanie zasad projektowych

Zasady bezpieczeństwa dla zakładów procesowych (chemicznych, rafinerii, energetyki jądrowej) [4] w części dotyczącej projektowania i budowy można podsumować następująco:

- Nadrzędnym celem jest zapewnienie bezpieczeństwa ludziom i środowisku.
- Bezpieczeństwo pracowników ma priorytet wyższy niż produkcja.
- Projekt ma gwarantować niezawodną i łatwą eksploatację zakładu.
- W projekcie trzeba stosować zasadę wielokrotnych poziomów ochrony.
- Projekt instalacji powinien minimalizować prawdopodobieństwo wystąpienia uszkodzeń lub ich kombinacji mogących prowadzić do niebezpiecznych sytuacji.
- Rozwiązania techniczne przewidywane w projekcie muszą być zgodne z dobrą sztuką inżynierską (sprawdzone wcześniej w innych obiektach lub doświadczalnie).
- Na wszystkich etapach projektowania i przygotowania procedur obsługowych (serwisowych i produkcyjnych) trzeba uwzględniać problemy współpracy człowieka z obiektem i możliwość popełnienia błędu przez człowieka [5].
- Złożenie wniosku o dopuszczenie do budowy instalacji zakładowej musi być poprzedzone pełną analizą bezpieczeństwa pracy zakładu oraz weryfikacją projektu przez niezależną jednostkę pod kątem bezpieczeństwa pracy [7].
- Instalacje muszą być wykonywane zgodnie z przepisami dotyczącymi jakości wykonania.
- Uruchomienie instalacji musi zostać poprzedzone kompleksową walidacją zbudowanych instalacji i maszyn.
- Koniecznym etapem jest szkolenie personelu [9] obejmujące pracę w warunkach normalnej eksploatacji i w stanach awaryjnych oraz instrukcję działania awaryjnego i wytyczne działań w stanach awarii.

## LITERATURA

1. "An Introduction to Inherently Safer Design". New York: Center for Chemical Process Safety, 2009.
2. Ballal A., Geijerstam J. "Bhopal 2011 – Landscape of Memory". New Delhi: SpaceMatters, 2011.
3. Fearnley J. "Principles of Inherent Safe Design". CIE Conference. Phoenix, 2011.
4. "Final Report: Definitions for Inherently Safer Technology in Production, Transportation, Storage and Use". New York: Center for Chemical Process Safety The American Institute of Chemical Engineers, 2010.
5. Hendershot D. "An Overview of Inherently Safe Design". New York: Metro New York Section, 2010.
6. Hendershot D. "What Does Inherently Safer Mean?". New York: American Institute of Chemical Engineers, 2010.
7. Howat C.S. "Introduction to Inherently Safety Chemical Processes". Kansas City: Department of Chemical & Petroleum Engineering University of Kansas, 2008.
8. Kramarek W. „Strategia bezpieczeństwa maszyn i instalacji”. *Journal of Machine Engineering*. Wrocław. R. 17, z. 2 (2012).
9. Kramarek W., Szulewski P. „Podstawowe zagadnienia bezpieczeństwa maszyn i systemów”. *Journal of Machine Engineering*. Wrocław. R. 17, z. 2 (2012).
10. [www.pacontrol.com/safetysystems](http://www.pacontrol.com/safetysystems)
11. [http://en.wikipedia.org/wiki/Flixborough\\_disaster](http://en.wikipedia.org/wiki/Flixborough_disaster)