

Zagadnienia bezpieczeństwa elektrowni jądrowej

Nuclear power plant safety issues

WOJCIECH KRAMAREK*

DOI: 10.17814/mechanik.2016.2.16

Bezpieczeństwo energetyki jądrowej jest oceniane na podstawie trzech parametrów: prawdopodobieństwa wystąpienia poważnych awarii z przyczyn technicznych lub na skutek działalności ludzkiej, wytwarzania odpadów radioaktywnych i zagrożenia rozprzestrzenianiem broni jądrowej. Zadaniem systemów bezpieczeństwa jest zapobieganie niebezpiecznym sytuacjom. Choć elektrownie jądrowe są tak projektowane, aby były bezpieczne zarówno w czasie pracy, jak i w przypadku awarii, nie da się wykluczyć powstania sytuacji niebezpiecznych. Ocena bezpieczeństwa projektu elektrowni jądrowej należy do obowiązków agencji rządowych. Są one także odpowiedzialne za podejmowanie działań minimalizujących radiologiczne skutki ewentualnego sabotażu.

SŁOWA KLUCZOWE: bezpieczeństwo, systemy bezpieczeństwa, układy bezpieczeństwa, układy sterowania, normowanie europejskie

The safety of nuclear reactors is assessed by three main parameters: the possibility of serious accidents caused by either technology or human, the radioactive waste production and the nonproliferation of nuclear weapons. Safety systems are built to eliminate possibly dangerous situations. Design certification of reactors is the responsibility of national regulators. While nuclear power plants are designed to be safe in their regular operation and in the event of any malfunction, no industrial activity can be represented as entirely risk-free. Incidents and accidents can happen. The national regulator is responsible for ensuring that the plants are operated safely by the licensee and for preventing nuclear weapons proliferation.

KEYWORDS: safety integrated systems, safety control, safety of nuclear reactors, european directives and standards

W ocenie bezpieczeństwa energetyki jądrowej brane są pod uwagę trzy aspekty: możliwość wystąpienia poważnych awarii z przyczyn technicznych lub antropogenicznych (na skutek działań wojennych, terroryzmu), wytwarzanie odpadów radioaktywnych oraz zagrożenie rozprzestrzenianiem broni jądrowej.

Bezpieczeństwo pracy reaktora jądrowego

Funkcje zapewniające bezpieczną pracę reaktora jądrowego są następujące:

- sterowanie reaktywnością (ilością wytwarzanych neutronów), od której zależy moc reaktora,
- odprowadzanie ciepła od elementów paliwowych reaktora w czasie normalnej pracy oraz po zatrzymaniu reaktora,
- zatrzymywanie substancji promieniotwórczych podczas normalnej eksploatacji oraz w razie awarii reaktora.

Układ sterujący odpowiada za utrzymanie mocy reaktora na zadanym poziomie, dopóki zakłócenia nie przekroczą stanów awaryjnych.

Zapewnienie niezawodności działania układów sterujących odpowiedzialnych za bezpieczeństwo reaktora

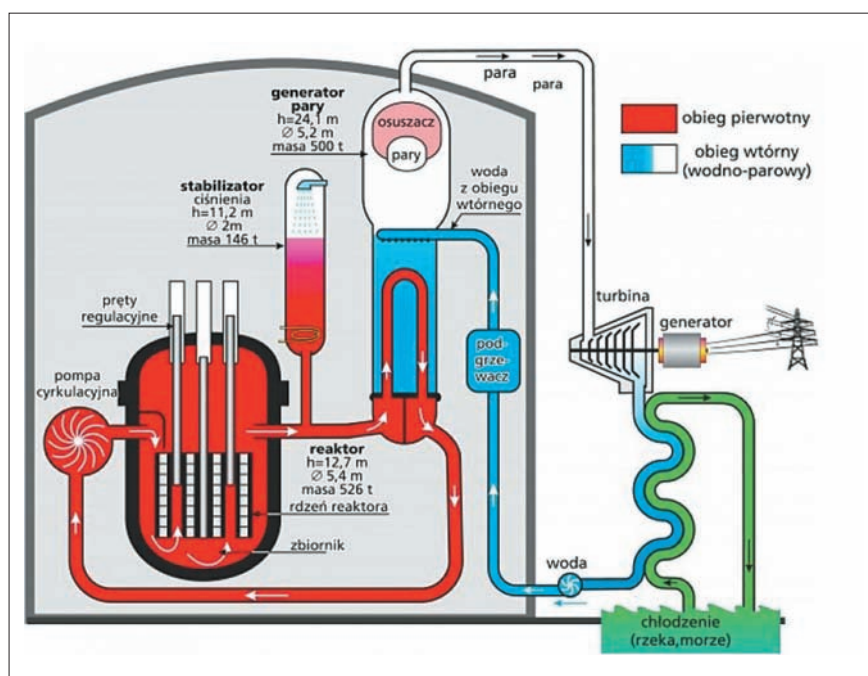
Bezpieczeństwo procesu lub obiektu, maszyny/urządzenia zależy przede wszystkim od trzech czynników:

- przebiegu procesu/konstrukcji obiektu lub maszyny (konstrukcje wewnętrznie bezpieczne),
- przyjętych rozwiązań systemów sterujących oraz użytych zabezpieczeń,
- obowiązujących procedur oraz poziomu świadomości pracowników.

Wzrost bezpieczeństwa obiektu lub procesu następuje najczęściej w wyniku zastosowania technicznych środków ochrony, czyli układów sterujących. Gdy w reaktorze jądrowym pojawi się sygnał informujący o wystąpieniu nieprawidłowości, układ sterujący podejmuje działania usuwające lub minimalizujące zagrożenia.

Systemy sterujące odpowiedzialne za bezpieczeństwo maszyn i instalacji nie zapewniają jednakowego poziomu bezpieczeństwa. Niektóre układy wykonują polecenia związane z powstającymi zagrożeniami tylko w przypadku prawidłowego działania wszystkich elementów systemu, inne natomiast potrafią realizować funkcje bezpieczeństwa nawet w razie uszkodzenia pewnej ilości elementów.

Normy IEC 61508 oraz IEC 61511 dotyczące procesów definiują niezawodność wykonywania poleceń związanych z bezpieczeństwem przez układy sterujące za pomocą parametru SIL (*safety integrity level*), nazywanego poziomem nienaruszalności bezpieczeństwa.



Rys. 1. Podstawowy schemat budowy bloku jądrowego: reaktor, pierwotny obieg chłodzenia, wtórny obieg, osłona biologiczna – kopuła żelbetowa [1]

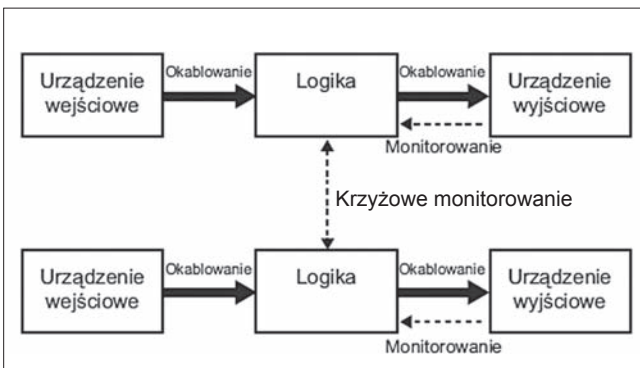
* Dr inż. Wojciech Kramarek (wojciech.kramarek@gmail.com) – Instytut Techniki Wytwarzania Politechniki Warszawskiej

Poziom nienaruszalności bezpieczeństwa określa prawdopodobieństwo prawidłowego zadziałania systemu bezpieczeństwa w określonych warunkach. Norma definiuje cztery poziomy SIL. Poziom SIL 1 daje najmniejsze gwarancje poprawnego zachowania układu sterującego w warunkach przywołania funkcji bezpieczeństwa, natomiast SIL 4 – największe.

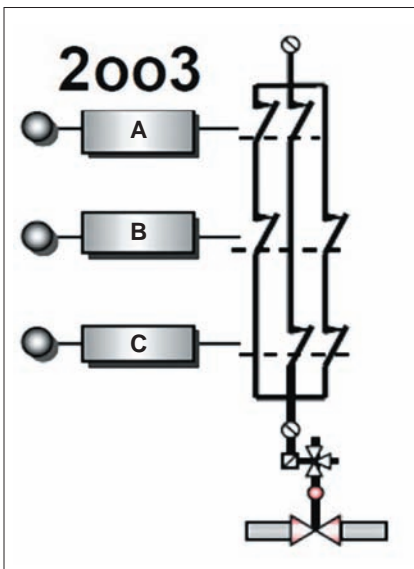
Im wyższe ryzyko wypadku oraz waga jego konsekwencji, tym wyższy jest wymagany poziom SIL systemu bezpieczeństwa. W energetyce jądrowej zagrożenie stwarzane przez elektrownię zarówno na terenie zakładu, jak i dla społeczności lokalnej jest maksymalne, dlatego systemy bezpieczeństwa elektrowni jądrowych muszą reprezentować poziom SIL 4.

Na poziom nienaruszalności bezpieczeństwa (SIL) wpływają następujące czynniki:

- architektura, struktura kanałowa układu (rys. 2, 3),
- niezawodność działania poszczególnych elementów układu,
- pokrycie diagnostyczne zależne od metod testowania układu,
- interwały testów sprawdzających oraz testów diagnostycznych,
- istotne dla bezpieczeństwa aspekty oprogramowania i uszkodzenia systematyczne układu sterującego.



Rys. 2. Struktura układu kanałowego (redundantna, nadmiarowa) z systemem testującym, odpornego na wystąpienie błędnego działania jednego kanału

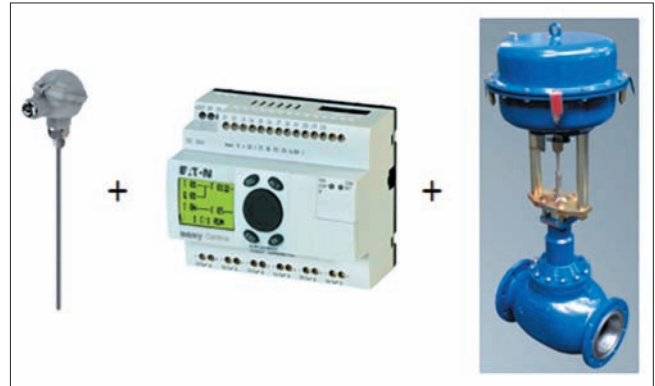


Rys. 3. Przykład rozbudowanej architektury systemu bezpieczeństwa. Działają trzy kanały zabezpieczeń. A, B, C to czujniki pewnego parametru, np. ciśnienia. Zadziałanie dwóch z trzech kanałów wywoła tryb awaryjny

Aktywne i pasywne systemy bezpieczeństwa

W systemach sterujących występują czujniki informujące o stanach procesu lub maszyny, układy logiczne analizujące sytuację i podejmujące odpowiednie decyzje oraz zespoły wykonawcze realizujące te decyzje.

W klasycznych układach podukłady całego łańcucha są zasilane energią z zewnątrz, najczęściej elektryczną.



Rys. 4. Przykład aktywnego układu sterującego zawierającego sensory, decyzyjne układy logiczne oraz elementy wykonawcze

W przypadku uszkodzenia zasilania system odpowiedzialny za bezpieczeństwo zawodzi. Takie systemy, obecnie najczęściej spotykane w układach procesowych, noszą nazwę aktywnych (rys. 4).

Metody pasywne zwiększania bezpieczeństwa polegają na zastosowaniu rozwiązań, które w sytuacjach niebezpiecznych nie wymagają działania układów elektrycznych czy elektronicznych, układów logicznych analizujących powstałe zagrożenie ani źródeł zasilania. W przypadku zagrożenia w układach biernego bezpieczeństwa następują jednak pewne działania, jak: zmiana otworów szczelin dławiących, zalanie układu czy wprowadzenie prętów kontrolnych w rdzenie reaktorów.

Prawdopodobieństwo zablokowania działania systemu pasywnego lub jego uszkodzenia jest małe, dlatego jest on bardziej niezawodny niż system aktywny.

Odbiór ciepła od reaktora

Rozgrzane elementy paliwowe przekazują ciepło do pierwotnego obiegu chłodzącego, który przekazuje je do obiegu wtórnego. Wytworzone ciepło służy najczęściej do produkcji pary wodnej napędzającej turbogenerator. Olbrzymim problemem jest ciepło powstające w reaktorze po jego zatrzymaniu. Choć stanowi ono ułamek procentu mocy cieplnej reaktora, jest to jednak moc znacząca, mogąca doprowadzić do przegrzania i stopienia elementów paliwowych.

Pierwszym zadaniem układu sterującego w przypadku odebrania informacji o jakiegokolwiek nieprawidłowości w pracy reaktora jest przerwanie reakcji rozszczepienia. Zatrzymanie reaktora zmniejsza ilość wytwarzanego ciepła, ale nadal powstaje ciepło powyłączeniowe. Podstawową kwestią jest więc zagwarantowanie odbioru ciepła od rdzenia po wyłączeniu reaktora.

W czasie normalnej pracy reaktora ciepło wydzielane w stosie jest odbierane przez czynnik chłodzący. Może nim być woda (zwykła lub ciężka), płynny metal (sód lub mieszanina ołowiu z bizmutem), stopione sole, ewentualnie gaz (hel, dwutlenek węgla lub gaz dysocjujący).

Układy aktywne zawierają trzy lub cztery równoległe podukłady chłodzenia reaktora ze zbiornikami chłodziwa, pompami i zaworami. Są to układy redundantne, również z funkcjami samonadzoru. Do skutecznego chłodzenia wystarczy jeden z kilku podukładów. W przypadku awarii podukładu jego zadania przejmuje podukład równoległy.

W najnowszych typach pracujących reaktorów (reaktorach III generacji) coraz częściej poza aktywnymi stosowane są również pasywne układy bezpieczeństwa (głównie systemy awaryjnego chłodzenia rdzenia). W europejskim EPR (*european pressurized reactor*) moderatorem jest woda, która odprowadza, gdy moc (temperatura) reaktora przekroczy poziom bezpieczeństwa. Neutrony powstające w reaktorze mają za dużą energię, by rozbić jądro uranu. Muszą zostać spowolnione przez moderator, czyli w wypadku EPR-ów –

przez wodę. Gdy ta wyparuje, neutrony nie będą spowalniane, a więc reakcja rozszczepienia szybko zostanie spowolniona i nastąpi zatrzymanie reaktora.

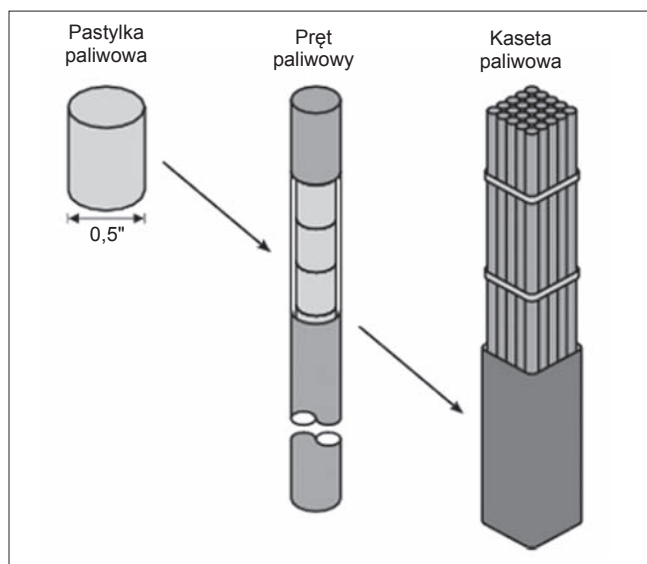
Zabezpieczenia przed uwalnianiem materiałów radioaktywnych

Nowoczesne reaktory jądrowe wyposaża się w zwielokrotniony system barier bezpieczeństwa chroniących przed uwolnieniem z obszaru reaktora materiałów radioaktywnych. Bariery te tworzą:

- materiał pastylek paliwowych (rys. 5),
- koszulki paliwowe,
- obieg pierwotny chłodziwa wraz ze stalowym korpusem reaktora (rys. 6),
- żelbetonowa obudowa bezpieczeństwa (rys. 7).

W czasie pracy reaktora w paliwie uranowym powstają produkty rozszczepienia. Pozostają one w paliwie także po zatrzymaniu reaktora. Osłony pastylek paliwowych to pierwsza bariera bezpieczeństwa.

Produkty rozszczepienia atomów w postaci gazowej wydostają się częściowo poza elementy paliwowe, ale są zatrzymywane przez otaczające paliwo koszulki z cyrkonu. Koszulki stanowią drugą barierę chroniącą przed uwolnieniem produktów rozszczepienia paliwa.



Rys. 5. Widok pastylki paliwowej, pręta paliwowego oraz zespołu prętów paliwowych

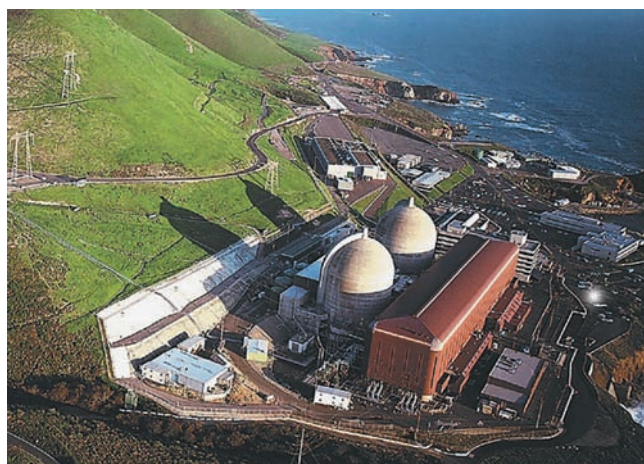
Czynnik chłodzący paliwo jądrowe przepływa w obiegu, którego elementy (stalowy korpus reaktora, rury itp.) są wykonywane z zachowaniem zasad maksymalnej jakości.

Podstawowym zagadnieniem jest utrzymanie szczelności tego obiegu. Elementy obiegu pierwotnego są cyklicznie kontrolowane podczas pracy reaktora oraz w stanach zatrzymań.

Reaktor jest otoczony kopułą ze zbrojonego betonu – to czwarta bariera bezpieczeństwa (rys. 7). Jest ona wykonywana najczęściej z dwóch koncentrycznych warstw i ma dodatkową wykładzinę stalową od wewnątrz, zwiększającą szczelność tej obudowy.

Elektrownia jądrowa wytwarza niewielkie ilości odpadów, ale są one promieniotwórcze. Takich odpadów nie można utylizować (poza wykorzystaniem niektórych ich składników do celów medycznych lub badawczych). Muszą być przechowywane w sposób niezagrażający ludziom i środowisku przez czas ich aktywności promieniotwórczej. Okres połowicznego rozpadu radioaktywnych produktów może trwać nawet tysiące lat. Odpady takie wymagają trwałego składowania w miejscach trudno dostępnych. Najczęściej są zalewane betonem lub szkłem i umieszczane w nieczynnych wyrobiskach lub w specjalnych basenach.

Rys. 6. Trzecia bariera ochronna reaktora: wysokościennej stalowy korpus reaktora



Rys. 7. Czwarta bariera ochronna reaktora – ochronne kopuły żelbetonowe elektrowni jądrowej w Diablo Canyon, USA [5]

Poziomy bezpieczeństwa według IAEA

Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej (International Atomic Energy Agency – IAEA), klasyfikując reaktory pod względem bezpieczeństwa, przydziela im poziomy bezpieczeństwa od A (najwyższego) do D (najniższego). Poziomy bezpieczeństwa zależy od braku:

- wymuszonego przepływu chłodziwa,
- ruchomych elementów mechanicznych,
- inteligentnych sensorów określających stany reaktora,
- zewnętrznych źródeł zasilania.

Wielowarstwowe poziomy zabezpieczeń

Energetyka jądrowa, która w przypadku awarii powoduje poważne zagrożenia dla społeczności lokalnych, wymaga stosowania wielowarstwowych poziomów zabezpieczeń.

Na pierwszym poziomie przewiduje się wprowadzanie do projektu rozwiązań sprzyjających bezpieczeństwu procesu. Zaliczamy do nich:

- dobór takich napędów układów sterowania i regulacji, aby awarie zasilania powodowały przerwanie przebiegu procesu,
- objęcie projektu i budowy zakładu, a zwłaszcza jego wyposażenia, programem zapewnienia jakości,
- przyjęcie zasady, że wszystkie systemy istotne z punktu widzenia bezpieczeństwa obiektu powinny być redundantne, wielokanałowe, rozdzielone przestrzennie i działać na różnych zasadach,

- walidację (testy odbiorcze) obiektu przed jego przekazaniem,
- testowanie układów w trakcie użytkowania zgodnie z założonymi harmonogramami oraz ustalonymi procedurami przeprowadzania prób bezpieczeństwa reaktora.

Jeśli mimo zastosowanych środków technicznych, opracowanych procedur oraz przeprowadzonych szkoleń personelu pojawią się błędy obsługowe czy awarie urządzeń, zostaje uruchomiona druga warstwa zabezpieczeń. Włączają się wówczas systemy bezpieczeństwa (SIS – *safety integrated systems*; rys. 8).

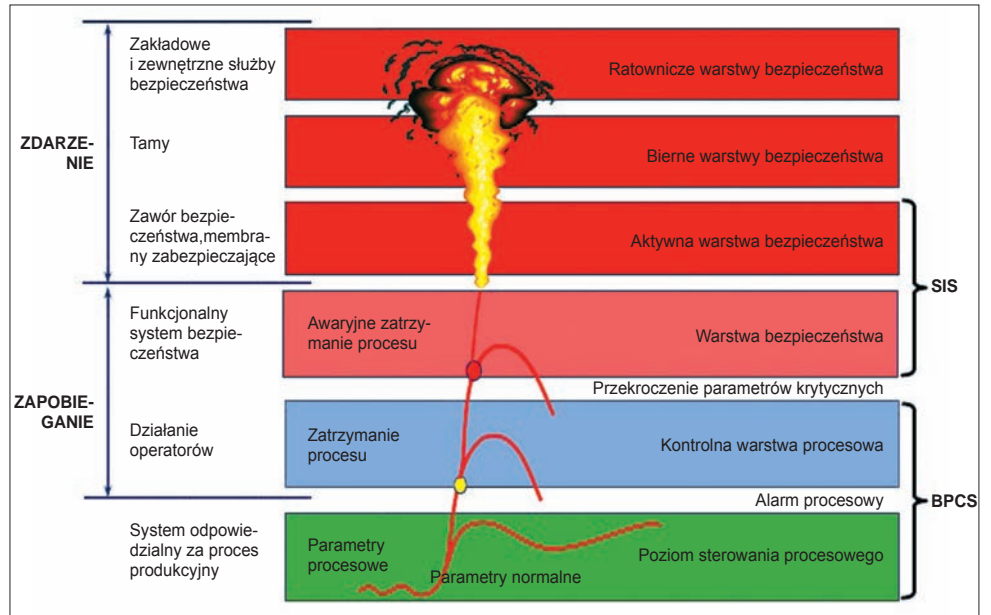
Trzeci poziom zabezpieczeń zakłada wystąpienie awarii mimo zastosowania systemów zabezpieczeń. Obejmuje dodatkowe systemy przeciwdziałania skutkom awarii: osłony metalowe

we, kurtyny wodne, tamy, fosy. Następny poziom dotyczy działania awaryjnych służb zakładowych przeszkolonych na wypadek zagrożeń procesowych oraz ratowniczych służb zewnętrznych (komunalnej straży pożarnej, ratowniczych służb chemicznych, służb medycznych itp.).

Ochrona obiektów jądrowych

Obiekty związane z energetyką jądrową mogą także stać się celem ataku terrorystów dążących do wywołania katastrofy jądrowej lub skażenia wybranego obszaru. Dlatego system ochrony materiałów i obiektów jądrowych łączy elementy administracyjne, techniczne i różnego rodzaju zapory fizyczne. Składa się z wielu powiązanych elementów. Do najważniejszych zaliczamy:

- procedury określające działanie służb ochronnych w strategicznych obiektach,
- sposoby użycia sprzętu zabezpieczającego obiektu.



Rys. 8. Schemat wielowarstwowych poziomów zabezpieczeń (SIS – *safety integrated systems* – systemy bezpieczeństwa; BPCS – *basic process control system* – układ sterujący odpowiedzialny za przebieg cyklu produkcyjnego)

LITERATURA

1. www.ncbj.edu.pl/pwr-wodny-cisnieniowy/obieg-pierwotny-i-wtorny-reaktora-pwr
2. www.schmersal.pl
3. Strupczewski A. „Bezpieczeństwo elektrowni jądrowych dawniej i dzisiaj”. Instytut Energii Atomowej, http://www.if.pw.edu.pl/~pluta/pldyd/mtj/zal2/CD_II_SZKOLA/I.%20ZAGADNIENIA_OGOLNE/5_A_Strupczewski_bezpieczenstwo_elektrorni.pdf
4. www.en.wikipedia.org/wiki/Industrial_safety_systems
5. www.endress.home.pl
6. Kramarek W. „Strategia bezpieczeństwa maszyn i instalacji”. *Journal of Machine Engineering*. R. 17, z. 2 (Wrocław 2012).
7. Kramarek W., Sałaciński T. „Energetyka jądrowa na świecie (1)”. *Przegląd Techniczny. Gazeta inżynierska*. Nr 20 (2013): s. 13+19.
8. Kramarek W. „Konstrukcje wewnętrznie bezpieczne”. *Mechanik*. Nr 5–6 (2015): s. 470+472.
9. Dźwiarek M. „Systemy lokalizacji w czasie rzeczywistym w bezpieczeństwie maszyn”. *Mechanik*. Nr 7 (2015): płyta CD, s. 223+230. ■