

Andrzej CYGANIK
Miroslaw WCIŚLIK

BEZPIECZEŃSTWO PROCESÓW PRODUKCYJNYCH

STRESZCZENIE *Bezpieczeństwo procesów produkcyjnych należy rozpatrywać w kilku aspektach. Najważniejszym wymogiem jest, aby maszyny produkcyjne były bezpieczne dla obsługujących je ludzi. W pracy przedstawiono normy dotyczące bezpieczeństwa maszyn oraz realizacji bezpiecznego sterowania z wykorzystaniem współczesnych środków technicznych, zabezpieczających obsługę przed potencjalnymi zagrożeniami. Pewne zabezpieczenie ekonomiczne zakładu produkcyjnego stanowią dodatkowe środki, które pozwalają wydłużyć okres eksploatacji maszyn, poprzez działania prewencyjne, które z wyprzedzeniem pozwolą reagować na symptomy zbliżających się awarii, a więc i przestojów. Artykuł prezentuje przykładowe środki techniczne, które mogą wspomóc konstruktorów i użytkowników w tych zamierzeniach.*

Słowa kluczowe: *bezpieczeństwo maszyn, normy maszynowe, sterowanie, systemy zintegrowane*

1. WSTĘP

Ewoluuące światowe ustawodawstwo zmieniło podejście społeczne do procesów produkcyjnych poprzez położenie nacisku na bezpieczeństwo produkcji. Celem takiego podejścia jest, aby dla procesu produkcyjnego utrzymać poziom potencjalnych zagrożeń na jakie narażony jest człowiek i jego otoczenie (środowisko) na jak najniższym poziomie.

mgr inż. Andrzej CYGANIK

e-mail: andrzej.cyganik@siemens.com

SIEMENS Sp.z O.O., ul. Żupnicza 11, 03-821 Warszawa

prof. dr hab. inż. Miroslaw WCIŚLIK

e-mail: m.wcislik@tu.kielce.pl

Politechnika Świętokrzyska, Al.1000-lecia PP 7, 25-314 Kielce

PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt 270, 2015

Służą do tego dodatkowe środki techniczne (mechaniczne, elektryczne i inne), które mogą nieco zmniejszyć wydajność oraz użyteczność maszyn produkcyjnych, ale których użycie zabezpiecza pracowników oraz zmniejsza zagrożenia dla środowiska naturalnego.

W różnych krajach lub regionach świata istnieją różne koncepcje bezpieczeństwa. Przykładem wysoko rozwiniętej świadomości bezpieczeństwa jest Europa. Istnieją tutaj dyrektywy, ustawy oraz standardy techniczne, które pomagają w budowie maszyny bezpiecznej oraz wskazują jak poprawnie ją eksploatować. Dla odmiany w USA wymogi bezpieczeństwa w różnych stanach, a nawet na rynkach lokalnych, różnią się. Niezależnie jednak od lokalizacji (Europa, USA) obowiązuje jedna podstawowa zasada: pracodawca musi zagwarantować pracownikowi bezpieczne miejsce pracy. W przypadku wystąpienia szkody, pełną odpowiedzialność za jej wystąpienie ponosi właściciel maszyny. W innych regionach świata podejście to może się różnić.

2. STANDARDY REGULUJĄCE BEZPIECZEŃSTWO

Z punktu widzenia chronionego obiektu (człowiek, środowisko) bezpieczeństwo procesów produkcyjnych można rozważać z różnych punktów widzenia. Rozpatrywane przyczyny powstania zagrożeń oraz środki techniczne mające je zredukować mogą być różne w różnych regionach świata ze względu na dostęp do technologii i różny poziom akceptowalnego ryzyka. Wynikiem tego jest rozpatrywanie różnego typu bezpieczeństwa. Dobrym przykładem jest określenie „bezpieczeństwo elektryczne” jeśli zastosowane środki mają za zadanie chronić przed zagrożeniami elektrycznymi (np. przed porażeniem prądem) lub bezpieczeństwo funkcjonalne, gdy bezpieczeństwo jest zależne od funkcji korygujących nieprawidłowe stany maszyn. Wspomniane różnice są tak wielkie, że zostały opisane w specjalnych standardach, które w ostatnich czasie zostały wprowadzone do stosowania (tab. 1).

W zakresie bezpieczeństwa maszyn wiodącymi są normy EN ISO 13849 i IEC 62061, które zawierają wymagania jakie musi spełniać system sterowania maszyną, aby jej zapewnić bezpieczeństwo funkcjonalne. W podstawowym standardzie bezpieczeństwa IEC 61508 (także EN 61508 i DIN 61508/VDE0803) IEC opisuje sposoby realizacji bezpieczeństwa funkcjonalnego z wykorzystaniem elektrycznych, elektronicznych oraz programowalnych elektronicznych systemów, niezależnie od dziedziny ich zastosowania.

3. BEZPIECZEŃSTWO SYSTEMÓW I BEZPIECZEŃSTWO FUNKCJONALNE

Aby osiągnąć bezpieczeństwo pracy maszyny a finalnie całego zakładu, podzespoły bezpieczeństwa (mające zapewnić bezpieczeństwo) oraz system(y) sterowania muszą działać prawidłowo, a w przypadku wystąpienia błędu (awarii) pozostać w stanie

gwarantującym bezpieczeństwo lub przeprowadzić maszynę do tzw. stanu bezpiecznego (zwykle jest to częściowe lub całkowite wyłączenie maszyny). Osiąga się to przez zastosowanie dedykowanej technologii, która spełnia wymogi zawarte w opisanych wcześniej standardach.

TABELA 1
Standardy regulujące bezpieczeństwo maszyn w Europie [1]

Podstawowe standardy bezpieczeństwa	Typ A Definicje podst. dla wszystkich maszyn	EN ISO 12100 Bezpieczeństwo Maszyn		- Podstawowa terminologia, ogólne założenia projektowe - Zasady oceny ryzyka		
Grupowe standardy bezpieczeństwa	Typ B1 Ważne aspekty bezpieczeństwa	Maks. otwory, prześwity dla uniknięcia zgniecenia części ludzkiego ciała EN 349	Podzespoły bezpieczeństwa w systemu sterowania EN 6206 EN SO 13849-1	Bezpieczne odległości chroniące kończyny przed dostępem do stref niebezpiecznych EN 924	Osprzęt elektryczny EB 60204-1	Bezpieczeństwo maszyn, podzespoły ryglujące z lub bez zamka EN 1088
	Typ B2 Wymagania dla podzespołów zabezpieczających (specjalistyczny osprzęt zabezpieczający)	Urządzenia sterujące dwuręczne EN 574	Urządzenia do realizacji STOP AWARYJNY, funkcje, zasady projektowe EN ISO 13850	Kurtyny świetlne, Bariery świetlne EN 614961-1		
Specjalistyczne standardy bezpieczeństwa	Typ C Standardy specjalistyczn, opisujące wymagania dla konkretnych maszyn	Windy EN 81-3	Wtryskarki EN 201	Prasy i piły EN 692 EN 693	Obrabiarki sterowane numerycznie EN ISO 23125	

Wymogi te mają na celu: uniknięcie błędów systematycznych, uniknięcie systematycznych i przypadkowych błędów sterowania oraz detekcja ewentualnych awarii. Miarą osiągniętego poziomu bezpieczeństwa funkcjonalnego jest prawdopodobieństwo wystąpienia niebezpiecznego błędu (awarii), tolerancja błędu oraz jakość sterowania, która powinna być zagwarantowana dzięki uniknięciu błędów systematycznych. Standardy używają różnych terminologii do określenia tych zagadnień. IEC 61508 nazywa to „Safety Integrity Level” (SIL) a EN ISO 13849-1 używa nazwy „Performance Level” (PL). Wymóg aby zakłady, maszyny oraz inne urządzenia poprzez zastosowanie dodatkowych najnowocześniejszych technologii były tak bezpieczne, jak to jest tylko możliwe, sprawia, że zarówno producent, jak i jej użytkownik są odpowiedzialni za bezpieczeństwo maszyny. Przez spełnienie wymogów zawartych w maszynowych standardach bezpieczeństwa (tab. 1) zakłada się, że maszyna wyposażona



Rys. 1. Technologie bezpieczeństwa maszyn [1]

jest we wbudowane najnowsze technologie bezpieczeństwa, a to z kolei zaświadcza, że producent maszyny spełnił swoją odpowiedzialność związaną z zapewnieniem bezpieczeństwa (rys. 1).

4. BEZPIECZEŃSTWO SYSTEMÓW STEROWANIA

Standardy bezpieczeństwa opisują poprawne zachowanie się maszyny w przypadku osiągnięcia przez nią stanu, który został uznany za niebezpieczny. Interpretacja wymagań zawartych w standardach jest jednoznaczna, jednak nie jest narzucona ich techniczna realizacja. W wyniku tego producenci urządzeń bezpieczeństwa mogą stosować do nich swoje autorskie, firmowe rozwiązania.

Stosowanie różnych rozwiązań technicznych do osiągnięcia tego samego bezpieczeństwa (poziom SIL/PL) może wzbudzać wątpliwości lub dywagacje na temat ich jakości. Dlatego producenci zwracają się do uznanych, nadzorujących rynek instytucji aby te potwierdziły jakość ich produktów. Najbardziej cenionym w tej roli, w Europie, jest niemiecki TÜV (Technischer Überwachungs Verein – Stowarzyszenie Nadzoru Technicznego). Producenci oferując swoje urządzenia dołączają do nich specjalne certyfikaty, które poświadczają spełnienie wymogów zawartych w odpowiednich, obowiązujących dyrektywach i najnowszych standardach.

5. TECHNICZNA REALIZACJA BEZPIECZEŃSTWA

Systemy bezpieczeństwa można podzielić na dwie grupy:

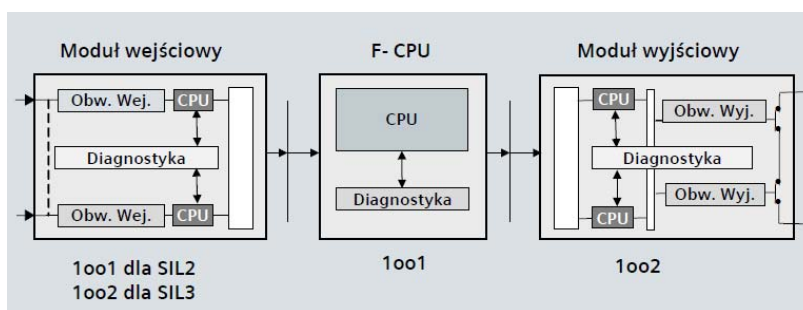
- autonomiczne systemy bezpieczeństwa (realizujące tylko funkcje bezpieczeństwa),
- zintegrowane systemy sterowania i bezpieczeństwa (realizujące funkcje sterowanie i bezpieczeństwo).

System bezpieczeństwa składa się z trzech podstawowych elementów:

1. podzespoły inicjujące (np. czujniki położenia, przyciski awaryjnego stopu),
2. urządzenia oceniające (przełączniki, sterowniki PLC bezpieczeństwa),
3. elementy wykonawcze (np. styczniki, przekształtniki).

O ile zasada działania elementów nr 1 i 3 jest praktycznie taka sama, elementy oceniające bazują na rozwiązaniach autorskich producentów. Szczegóły rozwiązań autorskich często są opatentowane i stanowią intelektualny kapitał firmy (know-how). Ważny jest więc certyfikat wydany przez niezależnego eksperta (TÜV), który nie zdradzając szczegółów potwierdza spełnienie obowiązujących przepisów. Porównywanie urządzeń bezpieczeństwa różnych producentów mija się z celem. Każde z nich jest inne i każde z nich wyposażone jest w inne mechanizmy przetwarzania. Porównywalna jest tylko jakość przetwarzania, która lokuje urządzenie na odpowiednim poziomie SIL/PL.

Schemat budowy zintegrowanego systemu bezpieczeństwa firmy Siemens przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat blokowy zintegrowanych systemów bezpieczeństwa firmy SIEMENS [3]

Systemy bezpieczeństwa zintegrowanego firmy SIEMENS zawierają mechanizmy diagnostyczne i testujące przedstawione w tabeli 2.

Zastosowane rozwiązania techniczne oraz jakość użytej elektroniki pozwoliły uzyskać bardzo wysokie parametry jakościowe systemu (tab. 3).

TABELA 2

Funkcje bloków systemu z rysunku 2 [3]

Obwody wejściowe (WEJ)	Przetwarzanie (CPU)	Obwody wyjściowe (WYJ)
<ul style="list-style-type: none"> - architektura sprzętu 1001 lub 1002 - zwarcie do zasilania - zwarcie do masy - zwarcie pomiędzy kanałami - kontrola czasu przełączenia czujników wejściowych - zła logika obwodu wejściowego - przegrzanie elektroniki - błąd przetwarzania modułu 	<ul style="list-style-type: none"> - priorytet przetwarzania programu bezpieczeństwa - dedykowany edytor pisania programu bezpieczeństwa - dedykowane, certyfikowane przez TÜV funkcje programowe - dwutorowe przetwarzanie programu bezpieczeństwa - test jakości pracy procesora - w przypadku awarii wyłączenie wyjść - przegrzanie elektroniki 	<ul style="list-style-type: none"> - architektura sprzętu 1002 - test zwarcia do masy - test zwarcia do zasilania - test przeciążenia - test obwodów wewnętrznych - przegrzanie elektroniki - błąd przetwarzania modułu

Parametry te zostały potwierdzone przez niezależnego eksperta TÜV. Systemy sterowania zawsze są podporządkowane systemom bezpieczeństwa. Funkcja bezpieczeństwa ma więc zawsze wyższy priorytet niż algorytm sterujący procesem produkcyjnym (nadrzędność funkcji bezpieczeństwa).

TABELA 3

Parametry jakościowe zintegrowanych systemów bezpieczeństwa firmy SIEMENS [4]

Parametr	Opis	Wartość	Kwalifikacja
PFHD	Średnie prawdopodobieństwo wystąpienia błędu (na godzinę)	1×10^{-10}	SIL3/PLe
MTTF	Średni czas pracy do wystąpienia awarii	20 lat	SIL3/PLe
DC	Pokrycie diagnostyczne (statystyczna ilość rozpoznawanych błędów)	99%	SIL3/PLe

Rozbudowana funkcjonalność, konstrukcja oraz rozszerzona diagnostyka to cechy charakterystyczne systemów bezpieczeństwa. Dzięki nim, obwody odpowiedzialne za bezpieczeństwo statystycznie rzadziej będą ulegać awariom. W przypadku wystąpienia awarii, system bezpieczeństwa zapewni w jego obwodzie wymuszenie tzw. stanu bezpiecznego, który przeprowadzi maszynę do stanu bezpiecznego tj. w którym nie zagraża ludziom i otoczeniu.

6. BEZPIECZEŃSTWO EKSPLOATACJI

Opisane standardy opisujące bezpieczeństwo są jednym z najważniejszych aspektów konstrukcji maszyn. Jednak dotyczą one tylko tych obwodów sterujących, których stan wpływa na bezpieczeństwo pracy maszyny.

Poza obwodami bezpieczeństwa (realizującymi bezpieczeństwo funkcjonalne) maszyna wyposażona jest w wiele innych układów, które nie podlegają wymaganiom SIL/PL, a których jakość pracy też jest ważna, gdyż zapewniają odpowiednią wydajność linii oraz jakość produktu.

Bardzo ważna jest kondycja mechaniczna maszyny. Nasuwa się więc pytanie: czy system nadrzędny (sterowania) może monitorować kondycję mechaniczną maszyny? Okazuje się że istnieją takie urządzenia.

Każda maszyna, w której skład wchodzi elementy wirujące lub przemieszczające się generuje drgania. Drgania są więc naturalnym zjawiskiem dla maszyny, a producenci w danych technicznych podają naturalny poziom drgań, jaki ona wytwarza. Podzespoły mechaniczne ulegają naturalnemu zużyciu. Można powiedzieć, że drgania maszyny odwzorowują bieżący jej stan i mogą być pomocne dla oszacowania stopnia zużycia maszyny. Stąd jednym ze sposobów klasyfikacji maszyn jest wielkość generowanych przez nie drgań. Podział ten został ujęty w międzynarodowym standardzie PN-ISO 10816-1:1998 (Ocena drgań maszyny na podstawie pomiarów na częściach niewirujących) i jest używany do weryfikacji jakości stanu

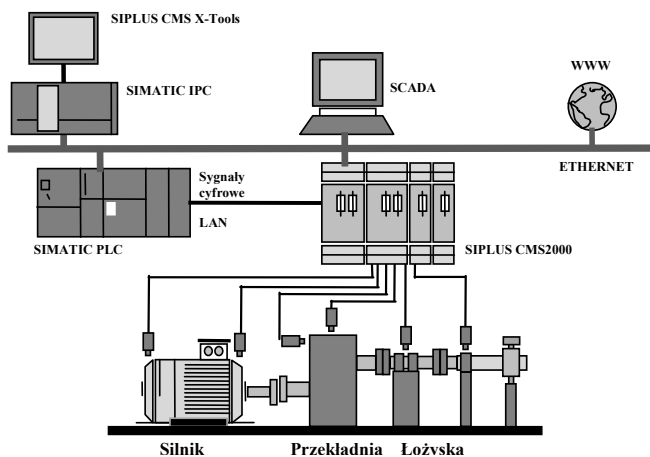
Przykładem stacjonarnego (średnio-zawansowanego) systemu diagnostycznego jest CMS2000 dostarczanego przez firmę SIEMENS – schemat na rysunku 3. Jest to urządzenie modułowe, składające się z jednostki bazowej (analizującej) i opcjonalnych modułów rozszerzających. System ma wbudowane uniwersalne wejścia cyfrowe i analogowe, a w opcji maksymalnej może zawierać do 16 czujników drgań i 6 czujników temperatury. Wszystkie sygnały podlegają analizie czasowej (wykresy czasowe) oraz progowej (limity wartości). Jednostka oceniająca ma wbudowane algorytmy i funkcje dla:

- pełnej diagnostyki stanu maszyny i łożysk (ISO, RMS, K(t), DKW),
- analizy widma częstotliwości dla dowolnego punktu pomiarowego (FFT),
- monitoringu limitów drgań, wartości procesowych, temperatury,
- rejestrowania wielkości charakterystycznych drgań, widma częstotliwości i przedstawiania ich w formie wykresów czasowych
- możliwość porównywania danych historycznych i bieżących.

Dodatkowe funkcje realizują:

- wyjścia sygnalizacyjne,
- eksport danych w postaci pakietów danych (RAW),
- wbudowany web-serwer (parametryzacja), obsługa e-maili,
- synchronizacja czasu przez sieć Internet.

CMS2000 może pracować jako autonomiczny system diagnostyczny lub można go podłączyć do systemu sterowania (i bezpieczeństwa) maszyny.



Rys. 3. Schemat poglądowy systemu CMS 2000 [6]

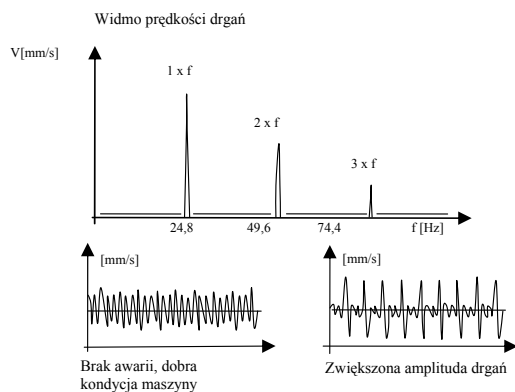
Wbudowane w CMS algorytmy analizy pozwalają wykryć:

- złe zamocowanie maszyny do podłoża,
- rezonanse części mechanicznych,
- złe wyważenie elementu wirującego,
- złe osiowanie elementów współpracujących,
- ugięcie części wirującej (wału),
- zużycie łożyska tocznego (luzy, temperatura),

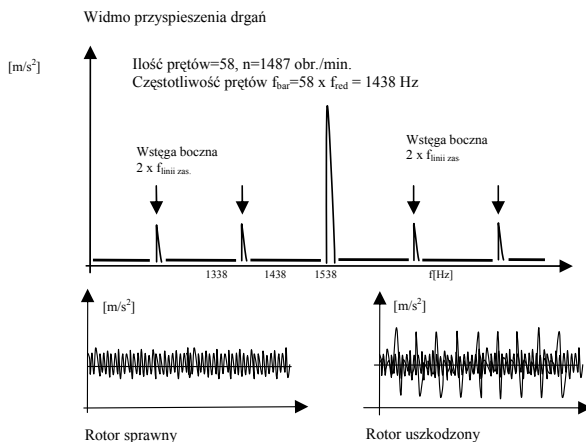
- luz łożyska ślizgowego,
- uszkodzenie pasa napędowego,
- uszkodzenie koła zębatego,
- zużycie sprzęgła lub przekładni,
- uszkodzenie łopat wentylatora,
- awaria rotora silnika.

Przykładowe przebiegi drgań oraz ich widma częstotliwościowe w przypadku złego wyważenia i awarii rotora przedstawiono odpowiednio na rysunku 4 i 5.

Lista wykrywanych usterek mechanicznych jest długa. CMS pozwala wykryć symptomy zbliżających się awarii mechanicznych, przez co naprawa może nastąpić w zaplanowanym przez obsługę czasie. Zaplanowane w czasie przeglądy, remonty i określanie na bieżąco stanu maszyny produkcyjnej zwiększają efektywność procesu oraz czyni produkcję bardziej bezpieczną. Zwłaszcza gdy zakład składa się z tysięcy



Rys. 4. Przykładowa analiza FFT - detekcja złego wyważenia [6]



Rys. 5. Przykładowa analiza FFT - detekcja awarii rotora silnik [6]

maszyn (napędów) i wyposażenie każdej z nich w indywidualne systemy diagnostyczne jest niemożliwe (jak np. w elektrowniach).

Rozwiązaniem kompromisowym nadzorowania jest zastosowanie analizatorów przenośnych do okresowych przeglądów maszyn w procesie produkcyjnym.

8. PODSUMOWANIE

Bezpieczeństwo maszyn to zestaw sprawdzonych rozwiązań, w które musi być wyposażona maszyna, aby nie stanowiła zagrożenia dla ludzi oraz otoczenia, w którym pracuje (środowiska) czyli, aby była bezpieczna. Bezpieczeństwo jest najważniejszym zagadnieniem podczas konstrukcji maszyn. W następnej kolejności projektant musi zadbać o bezpieczeństwo ekonomiczne maszyny. Oznacza to zwrot inwestycji w zaplanowanym czasie a następnie generacja zysku. Jedną z metod uzyskania tego jest zadbanie, aby praca maszyny przebiegała bezawaryjnie w całym cyklu jej eksploatacji. Jest to możliwe tylko wtedy, gdy odpowiednie służby techniczne dbają o bieżący stan maszyny, a wspomóc ich w tym mogą dedykowane systemy diagnostyczne. Tylko z ich pomocą można znaleźć słaby punkt maszyny, który wkrótce może przeobrazić się w nagłą awarię, a więc i przerwę w produkcji. Dzięki nim można rozplanować pracę maszyny tak, aby remonty nie kolidowały z planami produkcyjnymi.

Systemy diagnostyczne potrafią wykryć wiele stanów awaryjnych. Czy to jednak wszystko na co je stać? Zwłaszcza dziedzina elektrycznych dolegliwości maszyn budzi niedosyt. Przesłanki teoretyczne wskazują, że z opisanych pomiarów można uzyskać więcej informacji. Aby jednak tego dowieść, niezbędne jest przeprowadzenie badań na specjalnie skonstruowanym stanowisku doświadczalnym i wykonanie odpowiednich symulacji.

Dla zapewnienia bezpiecznej produkcji i eksploatacji maszyn stosuje się często dodatkowe czujniki drgań mechanicznych i rozbudowuje oprogramowanie warstwy nadrzędnej. Aby całość działała skutecznie, to dodatkowe wyposażenie musi być bardziej niezawodne niż chronione maszyny, a to oznacza że jest ono kosztowne. Biorąc powyższe pod uwagę należy rozważyć zwiększenie wykorzystania informacji z pomiarów wielkości elektrycznych. Aby to osiągnąć, powinny być opracowane modele opisujące odwzorowanie charakterystycznych awarii i przebiegów wielkości elektrycznych napędów elektrycznych.

LITERATURA

1. SIEMENS: Guide to Machine Safety Standard, White paper, January, 2013.
2. SIEMENS: Distributed Safety – configuring and programming, Operating Manual, March 2014.
3. SIEMENS: Functional Safety, Practical Implementation with Simatic Safety Integrated, 2009.

4. SIEMENS: Overview of Safety-Related Parameters for Siemens Components in Accordance with ISO 13849-1 and IEC 62061, March 2014.
5. PRÜFTECHNIK: , Machine diagnosis: Quick and easy through FFT analysis, 2007.
6. SIEMENS: SIPLUS CMS2000 Operating Instruction, October 2013.

Przyjęto do druku dnia 08.10.2015 r.

SAFETY OF PRODUCTION PROCESSES

Andrzej CYGANIK, Mirosław WCIŚLIK

ABSTRACT *The safety of production processes should be considered in several aspects. The most important requirement is that production machines are kept safe. The paper presents the standards for machinery safety and the implementation of safety control with the use of modern technical means securing support from potential threats. Certain economic hedge plant are additional measures that help extend the life of equipment, through prevention, which will advance to react to signs of impending failure and therefore downtime. The article presents examples of technical measures that can help designers and users in these plans.*

Key words: *machinery safety, machine standards, automatic control, integrated systems*



Mgr inż. Andrzej CYGANIK, absolwent Politechniki Krakowskiej. Przez ok. 10 lat pracował jako projektant, programista i integrator systemów automatyki przemysłowej w przemyśle ciężkim i energetyce. Po tym okresie został zatrudniony w firmie SIEMENS na stanowisku doradcy technicznego w zakresie systemów sterowania SIMATIC, zintegrowanych systemów bezpieczeństwa SIMATIC SAFETY INTEGRATED oraz systemów diagnostyki drgań SILPUS CMS.

Prof. dr hab. inż. Mirosław WCIŚLIK, wieloletni pracownik Wydziału Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Świętokrzyskiej, kierownik Katedry Elektrotechniki przemysłowej i Automatyki. Kieruje także Zakładem Urządzeń i Systemów Automatyki. Zajmuje się modelowaniem, symulacją i projektowaniem systemów sterowania i pomiarów, programowaniem sterowników PLC oraz problemami jakości zasilania i zgodności urządzeń elektrycznych. Autor i współautor kilkunastu publikacji z listy filadelfijskiej, kilku monografii i skryptów, kilkunastu zgłoszeń patentowych i patentów oraz wielu artykułów naukowo-technicznych.



IEI, Warszawa 2015. Nakład 135 egz. Ark. wyd. 16,41. Ark. druk. 12,12. Pap. off. K1.III. 80 g.
Oddano do druku w październiku 2015 r. Druk ukończono w październiku 2015 r.

Redakcja – Wydawnictwo Naukowo-Techniczne

Indeks nr 37656
