

**Marek Trajdos, Wojciech Roman**  
T-System Projekt Sp. z o.o., Klub „Paragraf 34”, Łódź

## **ELEKTRYCZNE UKŁADY O REGULOWANEJ PRĘDKOŚCI W UKŁADACH STEROWANIA MASZYN PRODUKCYJNYCH SPEŁNIAJĄCYCH WYMAGANIA BEZPIECZEŃSTWA**

### **ADJUSTABLE SPEED ELECTRICAL DRIVES IN PRODUCTION MACHINERY CONTROL SYSTEMS IN WHICH SAFETY REQUIREMENTS HAVE BEEN FULFILLED**

**Abstract:** This short document describes special safety functions which are implemented in modern adjustable speed electrical machinery. On the common European market all first-hand production machines shall fulfill safety requirements. Modern electrical drives are programmable electronic systems and are main parts of safety-related electrical, electronic and programmable electronic control system for machinery. Each part of drive safety system shall comply with the requirements of relevant safety and stop category.

#### **1. Wstęp**

Współcześnie obserwujemy stały trend do zwiększania udziału liczby elektrycznych napędów o regulowanej za pomocą przekształtników częstotliwości prędkości obrotowej w ogólnej liczbie napędów. Tendencja ta dotyczy oczywiście w górnej mierze układów napędowych prądu przemiennego, ponieważ trwa również (poza nielicznymi branżami) proces eliminacji aplikacji wykorzystujących technologię prądu stałego. Napędy elektryczne stanowią obecnie główną siłę napędową maszyn produkcyjnych, ciągów technologicznych i wielu innych urządzeń wykorzystywanych w przemyśle. Aplikacje w których są montowane w większości przypadków muszą spełniać wymagania bezpieczeństwa dla maszyn nowych lub będących w użytkowaniu, czyli odpowiednio wymagania zasadnicze i minimalne bezpieczeństwa Wspólnoty Europejskiej. Wobec powyższego projektanci zajmujący się maszynami nowymi oraz zagadnieniami modernizacji starszych maszyn produkcyjnych muszą stosować się do odpowiednich wymagań bezpieczeństwa. Zatem konieczne jest projektowanie oprócz typowego (technologicznego) układu sterowania, również drugiego zapewniającego bezpieczną pracę i zatrzymanie. W ogólnym wypadku dwa wymienione układy mogą być oddzielnymi aplikacjami (z zachowaniem funkcjonalnej nadrzędności systemu bezpieczeństwa) lub możliwe jest zastosowanie urządzeń sterujących zawierających zintegrowane elementy lub funkcje bezpieczeństwa. Funkcje takie są obecnie coraz

szerszej stosowane również w układach napędowych prądu przemiennego o regulowanej prędkości obrotowej.

Jedną z metod (najczęściej stosowaną) spełnienia wymagań bezpieczeństwa dla maszyn nowych jest skorzystanie z zasady domniemania. Wynika ona z faktu iż akty prawne, którymi są Dyrektywy WE oraz ich polskie harmonizacje wydawane w formie ustaw i rozporządzeń określają wymagania w sposób ogólny. W wielu przypadkach zbyt ogólny do bezpośredniego wykorzystania przez projektanta. W takim wypadku optymalne jest wykorzystanie właściwych norm technicznych, które zostały opracowane z myślą o pomocy w spełnieniu wymagań bezpieczeństwa. Normy takie nazywane są zharmonizowanymi w daną dyrektywę. Trzeba w tym miejscu podkreślić, że stosowanie norm nie jest obligatoryjne (mówi o tym artykuł 6. ustawy o normalizacji), ale jeżeli się z właściwego zestawu skorzysta w procesie projektowania, to na tej podstawie można wykazać, że spełnione zostały wymagania bezpieczeństwa. W takim wypadku listę norm zamieszcza się w treści deklaracji zgodności produktu.

Niniejsza praca ma na celu zwrócenie uwagi na najważniejsze normy zharmonizowane i funkcje bezpieczeństwa zintegrowane w wybranych przekształtnikach częstotliwości, których właściwe wykorzystanie prowadzi nie tylko do spełnienia wymagań bezpieczeństwa, ale również do optymalizacji projektu pod względem funkcjonalnym i ekonomicznym.

Należy podkreślić, że bezpieczeństwo układów napędowych ogólnie powinno być rozpatrywane zarówno pod kątem elektrycznym, jak i funkcjonalnym, którego głównym aspektem jest zagrożenie ruchem. W niniejszej pracy skoncentrowano się jedynie na problemie bezpieczeństwa funkcjonalnego.

## 2. Wybrane pojęcia podstawowe związane z bezpieczeństwem napędów maszyn produkcyjnych

W maszynach produkcyjnych układy napędowe w sensie wymagań bezpieczeństwa są elementami wykonawczymi, to znaczy poza typową, ogólnie znaną ich funkcją technologiczną polegającą na regulacji prędkości obrotowej silników elektrycznych jest realizacja podstawowych funkcji bezpieczeństwa. Najbardziej znana z nich jest funkcja zatrzymania awaryjnego, lecz współczesnym układom napędowym stawiane są przez projektantów również inne funkcje. Norma [6] podaje definicję aż trzynastu takich funkcji. Ponieważ przekształtniki częstotliwości będąc urządzeniami programowalnymi pozwalają na implementowanie tych funkcji w zakresie przyjętym przez danego producenta. Generalnie stosowane są w produktach napędowych dwie strategie konstrukcyjne: implementacja niewielkiej liczby funkcji bezpieczeństwa w każdym urządzeniu lub wprowadzanie na rynek prostych wersji przekształtników bez zintegrowanych funkcji bezpieczeństwa oraz modeli specjalnych z dużą ich liczbą. Według drugiej z przedstawionych wyżej strategii skonstruowano przekształtnik Sinamics G120. Aby spełnić zróżnicowane wymagania rynku falowników oraz obniżyć koszty produkcji rzutujące na cenę wyrobu dla danego urządzenia (rodziny urządzeń) wybrano konstrukcję modułową (rys.1.). Na rysunku 1 widzimy moduł mocy, moduł sterowania oraz panel operatorski służący do diagnostyki i parametryzacji. O ile moduł mocy i panel operatorski są identyczne zarówno dla urządzeń ogólnego zastosowania, jak i posiadających funkcje bezpieczeństwa, o tyle typ wymiennego modułu sterowania decyduje o tym czy dany przemiennik będzie elementem bezpieczeństwa, czy też nie. Ponadto chcąc zrealizować za pomocą falownika funkcję sterowania hamulcem silnika elektrycznego należy dodatkowo wyposażyć układ w opcjonalny przekaźnik. W konstrukcji przekształtników z rodziny Sinamics S120 wybrano zasadę integracji funkcji wybranych bez-

pieczeństwa w standardzie, zachowano jedynie opcjonalność zastosowania specjalnego przekaźnika jako aparatu do sterowania hamulcem.



Rys. 1. Modułowa budowa przekształtników Sinamics G120

Dla przekształtników „inżynierskich”, czyli przeznaczonych do realizacji bardziej skomplikowanych zadań sterowania technologicznego niewielki wzrost kosztów wyrobu spowodowany implementacją funkcji bezpieczeństwa wydaje się uzasadniony, natomiast włączanie do standardowego wyposażenia przekaźnika przeznaczonego do sterowania hamulcem bezpieczeństwa, który nie występuje w zbyt wielu aplikacjach nie było celowe. Z punktu widzenia wymagań bezpieczeństwa producent musi zadeklarować możliwość spełnienia przez urządzenie bezpieczeństwa określonych parametrów. W praktyce dla przekształtników zawierających funkcje bezpieczeństwa deklarowana jest 3. kategoria bezpieczeństwa (wg starszej normy PN-EN 954-1), poziom zapewnienia bezpieczeństwa PL d (wg nowszej normy [3]) lub poziom nienaruszalności bezpieczeństwa SIL 2. Pierwsze dwa z wymienionych parametrów przydatne są w projektowaniu systemów o niskim stopniu złożoności, a trzeci z nich wykorzystuje się w projektowaniu systemów o wysokim stopniu złożoności (np. duże instalacje przemysłowe). Wyższe wymagania stawiane są przekształtnikom, jako elementom systemu sterowania bezpieczeństwem rzadko, więc konstruowanie takich urządzeń nie jest ekonomicznie obecnie uzasadnione, gdyż w celu uzyskania wyższych kategorii używa się po prostu dodatkowego wyposażenia, jak np. styczników.

### 3. Funkcje bezpieczeństwa integrowane w przekształtnikach częstotliwości

Norma [6] definiuje szereg odrębnych funkcji bezpieczeństwa, które mogą być wykorzystywane w przekształtnikach częstotliwości. W poniższej tabeli zamieszczono ich oznaczenia i krótki opis:

Tabela 1. Funkcje bezpieczeństwa dla układów napędowych

STO	Bezpieczne wyłączenie momentu	Odłączenie silnika od źródła zasilania w energię
SS1	Zatrzymanie kategorii 1	Hamowanie dynamiczne i odłączenie zasilania po całkowitym zatrzymaniu
SS2	Zatrzymanie kategorii 2	Hamowanie dynamiczne i pozostawienie zasilania po zatrzymaniu lub osiągnięciu określonej prędkości (bezpiecznej)
SOS	Zatrzymanie bezpieczne robocze	Silnik zatrzymany bez działania sił zewnętrznych
SLS	Prędkość ograniczona bezpiecznie	Zabezpieczenie napędu przed przekroczeniem danej prędkości
SLT	Moment ograniczony bezpiecznie	Zabezpieczenie napędu przed przekroczeniem danej wartości momentu napędowego
SLP	Położenie ograniczone bezpiecznie	Napęd chroniony przed przejściem poza dopuszczalne położenie
SLI	Przyrost ograniczony bezpiecznie	Silnik obraca się o określoną wartość i zatrzymuje się
SDI	Bezpieczny kierunek	Ograniczenie kierunku wirowania
SMT	Temperatura ograniczona bezpiecznie	Ochrona przed przegrzaniem silnika
SBC	Bezpieczne sterowanie	Sterowanie hamulcem jako elementem bez-

	hamulcem	pieczeństwa
SCA	Bezpieczna krzywka	Sygnal bezpieczeństwa zmienia wartość, gdy silnik obraca się poza określonym, dopuszczalnym przedziałem kąta
SSM	Bezpieczne monitorowanie ograniczenia prędkości	Prędkość obrotowa poniżej pewnej wartości jest monitorowana zmianą poziomu sygnału bezpieczeństwa

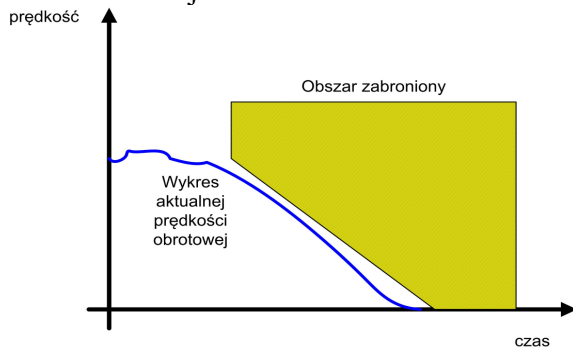
Wymienione wyżej funkcje muszą spełniać określone (zadeklarowane przez producenta) poziomy niezawodnego działania. Dzięki temu mogą być bezpośrednio wykorzystywane w procesie projektowania systemu sterowania bezpieczeństwem maszyny produkcyjnej. Niektóre z wymienionych funkcji, jak np. STO są względnie łatwe do zrealizowania innymi środkami, takimi jak układy styczników sterowanie przekaźnikami bezpieczeństwa, lecz inne, jak np. SLS wymagają zastosowania skomplikowanego układu złożonego ze styczników, hamulców, sprzęgieł oraz praktycznego podwojenia układu napędowego. Nie wszystkie z wymienionych funkcji są jednakowo popularne w układach napędowych. W najbogatszym zakresie występują one generalnie w obrabiarkach (automatycznych centrach obróbkowych). Na przykład funkcja SSM (Bezpieczne monitorowanie ograniczenia prędkości) jest zwykle wiązana z wytworzeniem właściwych warunków pracy filmu olejowego stosowanego do przemieszczania dużych mas przy minimalnym siły tarcia. Jednak kilka wymienionych funkcji stosuje się w napędach bardzo często, są to: STO, SS1, SLS i SBC. Do najważniejszych przyczyn takiego stanu rzeczy należą, w zależności od funkcji, dla:

- STO – łatwość realizacji polegająca na wykorzystaniu blokowania tranzystorów IGBT oraz przydatność dla napędów samohamownych (mała bezwładność i duże opory ruchu).
- SS1 – duża przydatność dla napędów, których obciążenie charakteryzuje się znaczną bezwładnością, przy niewielkich oporach ruchu.
- SLS – możliwość znacznego ograniczenia kosztów realizacji projektu oraz elastyczność w określaniu wartości prędkości granicznej. (W układach klasycznych konieczne było tworze-

nie kilku odrębnych zespołów napędowych, przełączanych sprzęgłami).

- SBC – w wielu układach napędowych analiza ryzyka wskazuje na konieczność zastosowania hamulca (akcyjne momenty obciążenia), a ta metoda wydaje się ekonomiczna i elegancka jednocześnie.

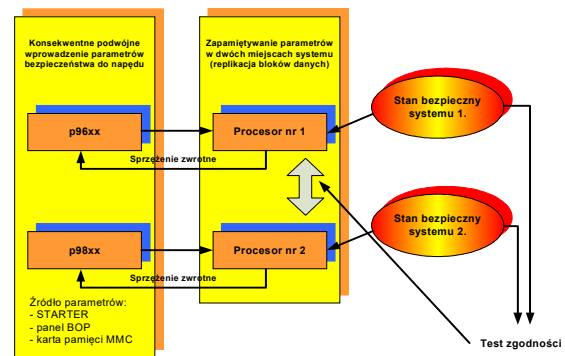
Na rysunku 2. pokazano przykładowo zasadę działania funkcji SS1.



Rys. 2. Funkcja bezpieczeństwa SS1

Jak widać na rysunku 2. aktualna prędkość napędu w funkcji czasu powinna w czasie dynamicznego, kontrolowanego zatrzymania pozostawać poniżej granicy obszaru zabronionego, który definiuje dynamikę zatrzymania (w sensie fizycznym wartość opóźnienia). Prowadzi to do bezpiecznego zatrzymania układu napędowego w określonym czasie. W wypadku naruszenia granicy obszaru zabronionego jest generowany sygnał, który może być wykorzystany do obsługi innej funkcji bezpieczeństwa (zatrzaśnięcia hamulca, odcięcia napędu od zasilania itp.). Przy czym potrzeba stosowania rozwiązań alternatywnych redundujących może wynikać z faktu konieczności implementacji dodatkowych zabezpieczeń algorytmu sterowania bezpieczeństwem maszyny dla wyższych kategorii bezpieczeństwa. Sam fakt zastosowania kategorii zatrzymania 1 (według normy [5]) wynikać musi z analizy ryzyka, która w prawidłowym procesie projektowania powinna wyprzedzać typowe czynności projektowe polegające na doborze właściwego sprzętu. Należy pamiętać, że ustalenie dynamiki zatrzymania jest jedną z czynności redukcji ryzyka, ponieważ jak mówi między innymi norma [4] – zatrzymanie bezpieczeństwa nie może stanowić źródła ryzyka (np. uszkodzenia konstrukcji w wyniku narzucenia układowi nadmiernej dynamiki, prowadzącej do uszkodzeń zagrażających życiu, czy mieniu). Realizacja opisanych wyżej funkcji bezpieczeństwa w układzie programowalnym nie byłoby możliwe bez spełnienia określonych

wymagań dotyczących zarówno sprzętu (hardware), jak i oprogramowania wewnętrznego (firmware) przekształtnika.



Rys. 3. Schemat blokowy systemu sterowania przekształtnika Sinamics G120 w części związanej z układem bezpieczeństwa

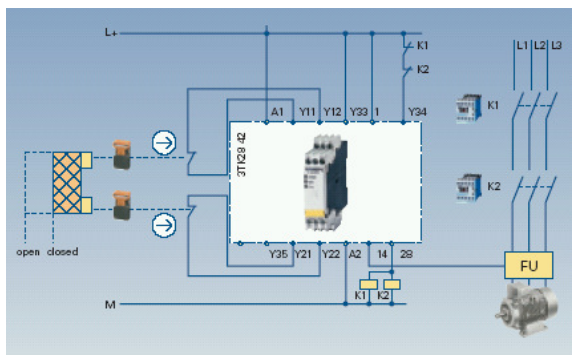
Jak podano wyżej do realizacji układu w kategorii 3. konieczna jest redundancja – stąd widoczna na rysunku 3. architektura dwuprocesorowa. Jednak nie wszystkie elementy systemu mieszczą się z sprzęcie, a zatem konieczne jest wprowadzenie w oprogramowaniu następujących dodatkowych elementów:

- ograniczenia dostępu do parametrów hasłem lub układem kilku haseł (stanowi to odpowiednik konieczności użycia narzędzia),
- wprowadzenie mechanizmu zachowania informacji o wprowadzanych zmianach wartości parametrów bezpieczeństwa (suma kontrolna lub nieusuwalny plik historii zmian),
- utworzenie funkcjonalności redundancji na płaszczyźnie programu (tu dwa oddzielnie zmieniane zbiory parametrów oraz potwierdzenie przeniesienia ich wartości do obszaru pamięci nieulotnej).

#### 4. Przykład zastosowania

Na rysunku 4. przedstawiono aplikację systemu sterowania bezpieczeństwem o niskim stopniu złożoności zrealizowanym zgodnie z wymaganiami 3. kategorii bezpieczeństwa i 1. kategorii zatrzymania. Na rysunku widzimy pełną redundancję układu (podwojenie wyłączników pozycyjnych ruchomej osłony maszyny i styczników odłączających układ napędowy od źródła energii). Przekaznik bezpieczeństwa stanowiący centralną część systemu (układ logiczny) na podstawie zmiany sygnału z wyłączników krańcowych wypracowuje decyzję o zatrzymaniu napędu. W tym wypadku zatrzymanie odbywa się w następujący sposób: wyjście 14. Przekaznika zmienia stan na niski i na odpowiednio

sparametryzowane wejście przekształtnika (FU) zostaje wydane polecenie zatrzymania przez obniżenie częstotliwości w zadanym czasie.



Rys. 4. Przykładowy układ sterowania bezpiecznym zatrzymaniem napędu zrealizowany w kategorii 3

Po jednoczesnym odliczeniu czasu o nie mniejszej wartości niż potrzebna do całkowitego zatrzymania silnika, drugie wyjście przekaźnika zmienia stan i otwarte zostają oba styczniki. Pokazany układ wykorzystuje przekształtnik bez zintegrowanych funkcji bezpieczeństwa, a więc w kategorii 3. stycznik musi być redundantny (podwojony). W wypadku zastosowania przekształtnika z funkcją SS1 redundancja wymagana w tej kategorii zostałaaby zrealizowana w oparciu o jeden stycznik i funkcję wewnętrzną falownika. Byłaby ona jeszcze pełniejsza, ponieważ oparta nie tylko na zdwojeniu, lecz i na różnicowaniu elementów. Ponadto zastosowano specjalny przekaźnik bezpieczeństwa z wyjściem o działaniu opóźnionym, a więc proste rozwiązanie bazujące na sekwencji czasowej, a nie zaawansowane – wykorzystujące ograniczenie dynamiki funkcją obszaru zabronionego (rys.2.).

## 5. Podsumowanie

Nowoczesne technologie stosowane w programalnych przetwornicach częstotliwości pozwalają nie tylko realizować różnorodne i niekiedy skomplikowane funkcje bezpiecznego sterowania maszyn produkcyjnych, minimalizując zagrożenie ruchem, lecz również w wielu wypadkach optymalizować koszty materiałowe projektu. Bez wykorzystania techniki nowoczesnego napędu elektrycznego ze sterowaniem mikroprocesorowym realizacja niektórych bardzo przydatnych funkcji bezpieczeństwa byłaby trudna, kosztowna, a nawet niemożliwa.

## 6. Literatura

- [1]. Trajdos M., Monkiewicz W.: *Rozruch i zatrzymanie napędu elektrycznego zgodnie z zasadniczymi wymaganiami bezpieczeństwa*. Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne nr 79, 2008, wyd. BOBRME Komel, s. 63-68
- [2]. Szczepka W.: *Praktyczne zastosowanie nowego sterowania SINUMERIK 802D sl z napędami Sinamics S120 Blocksize do obrabiarek CNC*. Mechanik 3/2009
- [3]. Polska norma: *PN-EN ISO 13849-1 Bezpieczeństwo maszyn – Elementy systemów sterowania związane z bezpieczeństwem – Część 1: Ogólne zasady projektowania*. PKN 2006
- [4]. Polska norma: *PN-EN ISO 13850 Bezpieczeństwo maszyn- Stop Awaryjny – Zasady projektowania*. PKN 2006
- [5]. Polska norma: *prPN-EN 60204-1 Bezpieczeństwo maszyn – Wyposażenie elektryczne maszyn – Część 1: Wymagania ogólne*. PKN 2008
- [6]. Polska norma: *PN-EN 61800-5-2 Elektryczne układy napędowe mocy o regulowanej prędkości – Część 5-2: Wymagania dotyczące bezpieczeństwa -- Funkcjonalne*. PKN 2007
- [7]. Siemens AG: *Safety Integrated SINAMICS S120. Function Manual 12/2007*. Siemens 2007
- [8]. Siemens AG: *Control Unit CU240S, CU240S DP, CU 240S DP-F, CU 240S PN. Operating Instructions. Edition 06/2007*. Siemens 2007
- [9]. Siemens AG: *Function Manual G120, G120D, ET200S FC, ET200 Pro FC. Function Manual – 06/2007*. Siemens 2007
- [10]. Siemens AG: *Power Module PM240. Hardware Installation Manual. Edition 4/2006*. Siemens 2006

## Autorzy

Marek Trajdos jest zatrudniony w firmie T-System Projekt, która zajmuje się projektowaniem, realizacją, wdrożeniami i serwisem układów automatyki. Zajmuje się zagadnieniami sterowania napędów elektrycznych i bezpieczeństwa maszyn. Jest Przewodniczącym Kapituły Klubu „Paragraf 34” oraz Członkiem Grupy Roboczej Krajowego Forum Konsultacyjnego Bezpieczeństwa Maszyn. Jest Członkiem KT 281 działającego w ramach Polskiego Komitetu Normalizacji.

Wojciech Roman jest zatrudniony w firmie T-System Projekt, która zajmuje się projektowaniem, realizacją, wdrożeniami i serwisem układów automatyki. Zajmuje się zagadnieniami mechatroniki, sterowania napędów elektrycznych i bezpieczeństwa maszyn. Jest Członkiem Klubu „Paragraf 34”.