

# Konfigurowanie obwodów sterowania w celu zwiększenia bezpieczeństwa pracy maszyn górniczych

## Część 2. Zatrzymanie awaryjne

mgr inż. Marek Majewski  
Instytut Techniki Górniczej KOMAG

### Configuring the control circuits to increase safety of mining machines Part 2. Emergency stop

Streszczenie:

W artykule zdefiniowano funkcję bezpieczeństwa zatrzymania awaryjnego realizowaną przez system sterowania maszyny oraz określono wymagany poziom zapewnienia bezpieczeństwa. Dokonano analizy parametrów elementów systemu sterowania w aspekcie niezawodności funkcji zatrzymania awaryjnego oraz wykazano, że funkcja ta powinna być realizowana przez redundantny system sterowania. Na podstawie wymagań dotyczących funkcji bezpieczeństwa zatrzymania awaryjnego wyznaczono architekturę systemu oraz poziom zapewnienia bezpieczeństwa PL spełniany przez systemy sterowania.

Słowa kluczowe: górnictwo, elektrotechnika, bezpieczeństwo, funkcje bezpieczeństwa, systemy sterowania, redukcja ryzyka

Keywords: mining, electrical engineering, security, functions security, control system, risk reduction

Abstract:

The emergency stop function executed by the machine control system is defined and safety level required to reduce the risk related to the hazards and to the use of the function itself is determined. Parameter selection for the control system is verified, and it is found that the function ought to be performed by redundant control system. Taking into account the requirements determined for the safety stop function, the architecture of the system is set as well as PL security level is met by the control systems.

## 1. Wprowadzenie

Jednokanałowe systemy sterowania realizujące funkcje bezpieczeństwa osiągają maksymalnie wymagany poziom zapewnienia bezpieczeństwa PLc kategorii 1 [3]. Poziom ten jest zadawalający i uzyskany przez zapewnienie wysokiej niezawodności elementów systemów sterowania. W obwodach sterowania realizujących funkcję zatrzymania awaryjnego, przeznaczonych do maszyn dużego ryzyka, powinny być zastosowane dodatkowe środki zwiększające ich odporność na uszkodzenia. Zastosowanie dodatkowych środków wynika z potencjalnych skutków braku realizacji tej funkcji bezpieczeństwa. Parametry elementów systemu sterowania realizującego funkcję zatrzymania awaryjnego przedstawiono w niniejszej części 2 artykułu.

## 2. Wymagania dla funkcji bezpieczeństwa zatrzymania awaryjnego

Funkcja bezpieczeństwa zatrzymania awaryjnego maszyny jest realizowana przez system sterowania, w którym zastosowano dodatkowe, techniczne środki pozwalające na zapobieganie, wykrycie lub tolerowanie pojedynczych defektów. Kategoria systemu sterowania realizującego funkcję bezpieczeństwa zatrzymania awaryjne jest zależny od wymaganego poziomu zapewnienia bezpieczeństwa PLr. Wymagany poziom bezpieczeństwa jest wyznaczony na podstawie następujących parametrów:

- ciężkości urazów,
- częstości i/lub czasu trwania narażenia,

- możliwości uniknięcia zdarzenia niebezpiecznego lub ograniczenia szkody.

Dobór parametrów odbywa się przed zastosowaniem danej funkcji bezpieczeństwa, która ma po zastosowaniu zmniejszyć ryzyko do akceptowalnego poziomu [1].

### 2.1. Ciężkość urazów

Podczas szacowania ryzyka uwzględnia się następujące parametry [6]:

- urazy lekkie – S1, zwykle odwracalne, stłuczenia lub rany cięte bez dalszych komplikacji,
- urazy ciężkie – S2, zwykle nieodwracalne oraz śmierć.

Parametr ten jest określany w oparciu o historię wypadków na porównywalnych maszynach:

- stwarzających to samo ryzyko, w których zastosowano odpowiednie funkcje bezpieczeństwa w celu jego zmniejszenia,
- realizujących podobne procesy i wymagających podobnych działań operatora, w których stosowana jest podobna technika powodująca zagrożenia.

Przy podejmowaniu decyzji o wyborze parametru należy się kierować najczęściej spotykanymi skutkami wypadków.

### 2.2. Częstość i/lub czasy trwania narażeń

Norma PN-EN 13849-1:2016-02 [6] zaleca, aby czas trwania narażenia był określony na podstawie średniej wartości w stosunku do całkowitego czasu, w którym maszyna jest używana:

- F1 – gdy czas narażenia nie przekracza 1/20 całkowitego czasu operacji, a częstość nie jest większa niż jeden raz na 15 min,
- F2 – gdy konieczne jest regularna ingerencja w pracę maszyny lub częstości narażenia większej niż jeden raz na 15 min.

Norma [6] zaleca, aby F2 dobierać wtedy, gdy osoba lub różne osoby były często albo stale ekspozowane na zagrożenia.

### 2.3. Możliwość uniknięcia zdarzenia niebezpiecznego oraz prawdopodobieństwo jego wystąpienia

Parametry P1 lub P2 wynikają z prawdopodobieństwa uniknięcia zagrożenia oraz prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia niebezpiecznego [6] i wybiera się odpowiednio do okoliczności:

- P1 – w przypadku wystąpienia niebezpiecznej sytuacji istnieje możliwość uniknięcia zagrożenia lub znacznego zmniejszenia jego skutków,
- P2 – w przypadku wystąpienia niebezpiecznej sytuacji nie istnieje możliwość uniknięcia zagrożenia.

Możliwości uniknięcia lub ograniczenia zagrożenia są zależne od:

- kwalifikacji, przeszkolenia, uprawnień oraz doświadczenia obsługi maszyny,

- szybkości zaistnienia zdarzenia i subiektywnych zdolności reagowania na zagrożenie przez osoby narażone,
- świadomości ryzyka – należy przyjąć, że obsługa maszyny zdaje sobie sprawę z istniejącego ryzyka, reaguje na znaki ostrzegawcze i urządzenia sygnalizacyjne,
- znajomości budowy wyposażenia maszyny, praktycznego doświadczenia i wiedzy.

Analiza prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia niebezpiecznego jest realizowana w oparciu o:

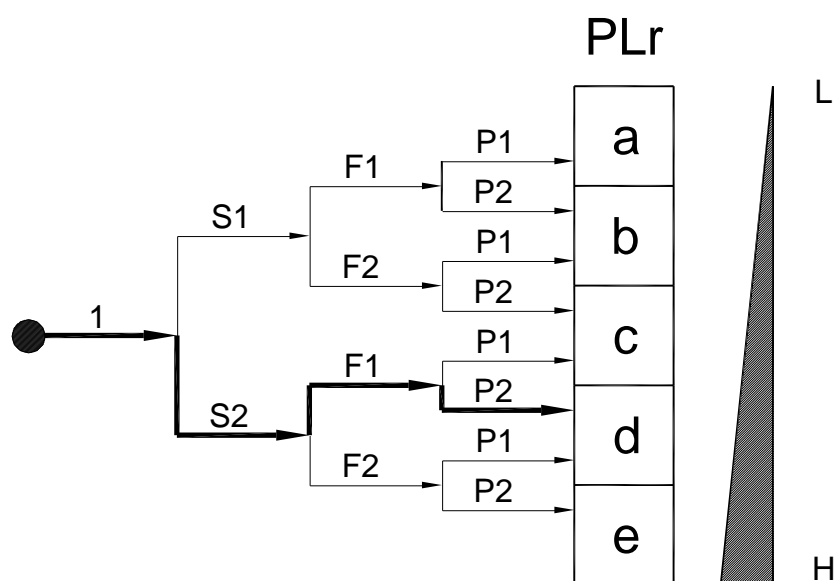
- niezawodność zastosowanych środków bezpieczeństwa,
- historię wypadków na podobnych maszynach.

#### 2.4. Wyznaczenie wymaganego poziomu bezpieczeństwa PLr dla funkcji zatrzymania awaryjnego

Dla funkcji bezpieczeństwa zatrzymania awaryjnego przyjęto następujące parametry:

- ciężkość urazów S2 – ciężkie nieodwracalne lub śmierć,
- częstość narażenia F1 – rzadkie, przy krótkim czasie narażenia,
- prawdopodobieństwo uniknięcia po zaistnieniu zdarzenia P2 – prawie niemożliwe.

W zagrożeniach związanych z ruchem elementów lub samej maszyny można przypuszczać, że powstałe urazy będą miały charakter obrażeń ciężkich, stąd przyjęto S2. Obsługujący stanowiska pracy związane z maszyną posiadają odpowiednie kwalifikacje oraz świadomość ryzyka stąd przyjęto, że może dojść do przypadkowego narażenia trwającego krótko. Przyjęto też, że powstałego już zagrożenia nie da się uniknąć, stąd P2.



Rys. 1. Graf służący do określenia wymaganego poziomu bezpieczeństwa PLr dla funkcji zatrzymania awaryjnego [opracowanie własne na podstawie [6]]

gdzie:

1 – punkt początkowy udziału funkcji bezpieczeństwa w zmniejszeniu ryzyka, wybierany po zastosowaniu technicznych środków zmniejszenia ryzyka,

L – mały udział funkcji bezpieczeństwa w zmniejszeniu ryzyka,

H – duży udział funkcji bezpieczeństwa w zmniejszeniu ryzyka,

PLr – przyjmujący oznaczenie od PLa do PLe w zależności od parametrów podanych w pkt. 2.1-2.3 – poziom zapewnienia bezpieczeństwa.

W wyniku jakościowego oszacowania ryzyka określono, że funkcja bezpieczeństwa zatrzymania awaryjnego powinna zapewniać poziom bezpieczeństwa **PLd**.

## 2.5. Kategorie elementów systemu sterowania związane z zatrzymaniem awaryjnym

W punkcie 2.4 wyznaczono wymagany poziom zapewnienia bezpieczeństwa PLd. Uzyskanie wyżej wymienionego poziomu poprzez zastosowanie systemu sterowania SRP/CS wymusza odniesienie do parametrów zgodnych z wymaganiami dla właściwej kategorii B, 1, 2, 3 lub 4. Kategorie określają wymagane zachowanie się SRP/CS w aspekcie ich odporności na defekty. Kategoria B jest podstawowa. W kategorii 1 poprawę odporności na defekty osiąga się w wyniku doboru elementów składowych systemu sterowania i sposobu ich stosowania. W kategorii 2, 3, 4 poprawę skuteczności osiąga się w wyniku doskonalenia struktury systemu SRP/CS. W kategorii 2 okresowo sprawdza się, czy jest realizowana funkcja bezpieczeństwa. W kategorii 3 lub 4 osiąga się to w wyniku spełnienia warunku, że wystąpienie pojedynczego defektu nie powoduje utraty funkcji bezpieczeństwa. Defekty są wykrywane w kategorii 4, a w przypadkach uzasadnionych również w kategorii 3.

Wybór kategorii dla określonego systemu sterowania SRP/CS zależy od [6]:

- zmniejszenia ryzyka, które ma osiągnąć funkcja bezpieczeństwa (udział danego elementu systemu sterowania),
- wymaganego poziomu zapewnienia bezpieczeństwa,
- ryzyka powstałego w przypadku defektu danego elementu,
- możliwości uniknięcia defektu danego elementu (defekty systematyczne),
- prawdopodobieństwo wystąpienia defektu danego elementu,
- średniego czasu do wystąpienia uszkodzenia niebezpiecznego,
- pokrycia diagnostycznego (skuteczność diagnostyki w wykrywaniu uszkodzeń niebezpiecznych w odniesieniu do wszystkich uszkodzeń niebezpiecznych),
- uszkodzenia o wspólnej przyczynie (kategoria 2, 3, 4).

Ponieważ układy sterowania maszyn górniczych nie są wyposażone w urządzenia testujące, w niniejszym opracowaniu nie rozpatrywano warunków spełnienia kategorii 2.

W celu osiągnięcia kategorii 3 jest wymagane stosowanie architektury redundantnej układu sterowania. Układ sterowania tej kategorii powinien spełniać wymagania kategorii B i powinien być zaprojektowany, zbudowany, dobrany, zmontowany i zestawiony z kombinacji, co najmniej zgodnej z wymaganiami stosownych norm z zastosowaniem podstawowych zasad bezpieczeństwa tak, aby był odporny na:

- występujące narażenia podczas pracy, tj. zdolność do przełączania obwodów, w których jest zastosowany,
- warunki środowiskowe występujące w miejscu pracy,
- wpływ czynników zewnętrznych.

Ponadto należy:

- zastosować wypróbowane sposoby zapewnienia bezpieczeństwa,
- zaprojektować układ tak, aby pojedynczy defekt któregośkolwiek elementu nie powodował utraty funkcji bezpieczeństwa,

- pokrycie diagnostyczne powinno być niskie lub średnie,
- średni czas do uszkodzenia niebezpiecznego powinien być w zakresie od niskiego do wysokiego,
- zastosować układ redundantny,
- zastosować środki zapobiegające uszkodzeniom o wspólnej przyczynie.

Układ sterowania kategorii 3 charakteryzuje się tym, że:

- przy wystąpieniu pojedynczego defektu funkcja bezpieczeństwa jest nadal realizowana,
- część defektów zostaje wykryta,
- niewykryte defekty, mogą spowodować utratę funkcji bezpieczeństwa.

Układy kategorii 4 charakteryzują się tym, że:

- przy wystąpieniu pojedynczego defektu funkcja bezpieczeństwa jest zawsze realizowana,
- defekty są w czasie wystarczającym do uniknięcia utraty funkcji bezpieczeństwa,
- nagromadzenie niewykrytych defektów jest brane pod uwagę.

### **3. Weryfikacja poziomu zapewnienia bezpieczeństwa funkcji zatrzymania awaryjnego**

W maszynach górniczych są stosowane systemy sterowania składające się z elementów, do których najczęściej brak szczegółowych, katalogowych danych niezbędnych do przeprowadzenia wnikliwej analizy funkcji bezpieczeństwa. Wynika to z przeważnie z konieczności przeprowadzenia kosztownych badań. Stąd analizę poziomu zapewnienia bezpieczeństwa przeprowadza się na podstawie metody opisanej i przedstawionej w normie PN-EN ISO 13849-1:2016-02 [6].

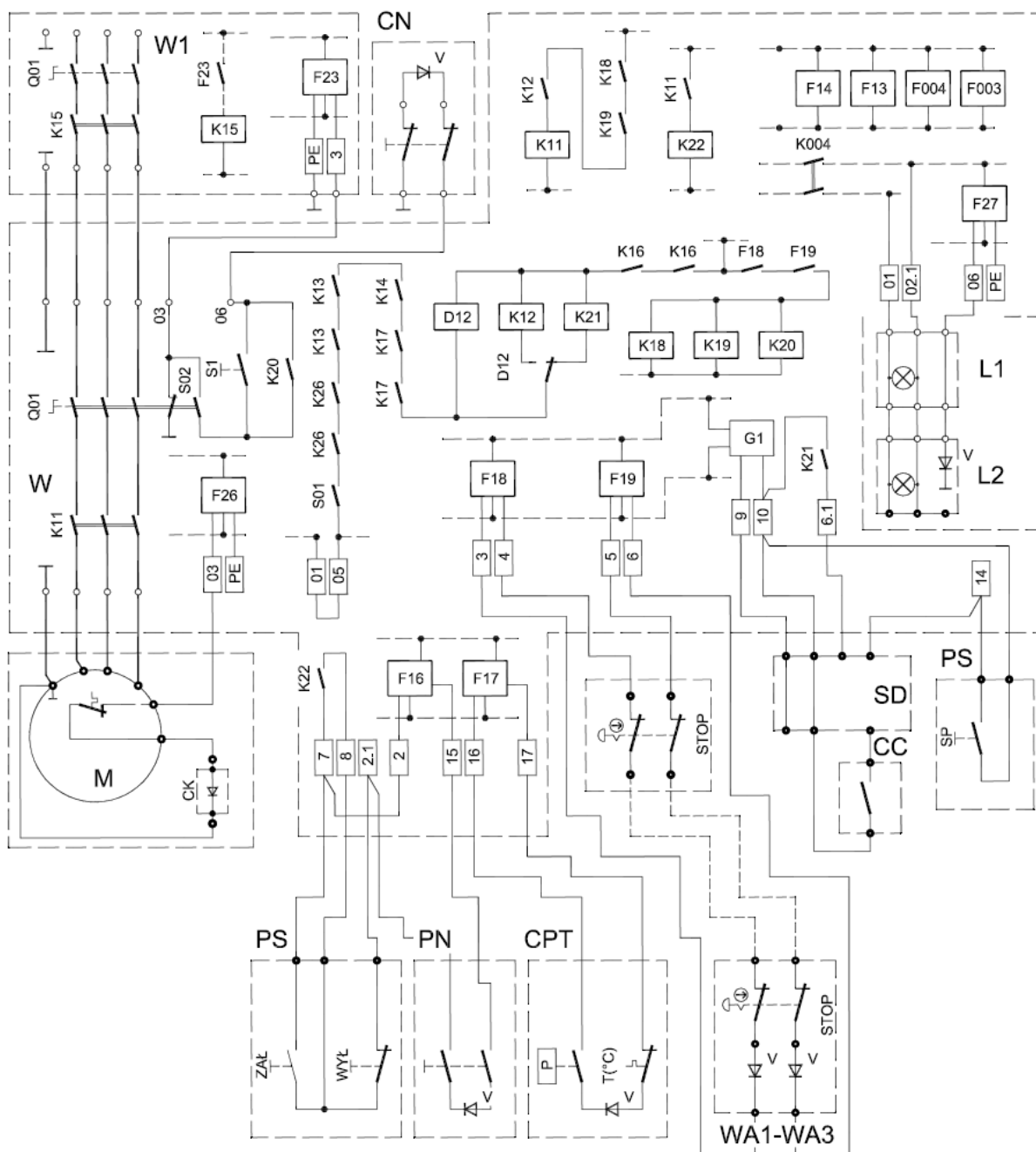
W przypadkach związanych z ruchem maszyny zagrażających zdrowiu otaczających ją osób należy zastosować funkcję bezpieczeństwa w postaci zatrzymania awaryjnego. Po wywołania funkcji zatrzymania awaryjnego efekt sygnału powinien być podtrzymywany przy pomocy przycisków z ryglowaniem. Maszyna zatrzymuje się na skutek działania hamującego silników hydraulicznych napędowych lub hamulców mechanicznych. Ponowne uruchomienie maszyny następuje po odryglowaniu przycisków.

W układzie sterowania maszyn górniczych można zdefiniować następującą funkcję bezpieczeństwa: „Zatrzymanie niebezpiecznych ruchów maszyny po naciśnięciu przycisku bezpieczeństwa wyłączników zatrzymania awaryjnego i uniemożliwienie ponownego ich uruchomienia do czasu odblokowania tych przycisków”. Elementy do zatrzymania awaryjnego maszyny, powinny być łatwo rozpoznawalne, widoczne i dostępne – wymagania normy PN-EN ISO 12100:2012 [5] (zwykle czerwony przycisk bezpieczeństwa na żółtym tle).

Na budowę układu bezpieczeństwa maszyn górniczych wpływa fakt, że są to maszyny przeznaczone do pracy w podziemnych zakładach górniczych w warunkach zagrożenia wybuchem metanu i/lub pyłu węglowego. Przykład układu sterowania maszyny górniczej z własną skrzynią aparaturową i wyłącznikiem stycznikowym zasilającym przedstawiono na rysunku 2.

Weryfikacja określonego w pkt. 2.4 poziomu zapewnienia bezpieczeństwa oraz wybranie kategorii 3 dla systemu sterowania realizującego funkcję bezpieczeństwa zatrzymania awaryjnego polega na przeprowadzeniu obliczeń zgodnych z normą PN-EN ISO 13849-1:2016-02 [6]. Wynik obliczeń powinien potwierdzić wyznaczony wcześniej poziom zapewnienia bezpieczeństwa PLd.

Na schemacie elektrycznym ideowym (rys. 2) pokazano realizację funkcji bezpieczeństwa, która odbywa się poprzez jednokanałowy system sterowania oraz realizację funkcji zatrzymania awaryjnego przez dwukanałowy system sterowania.



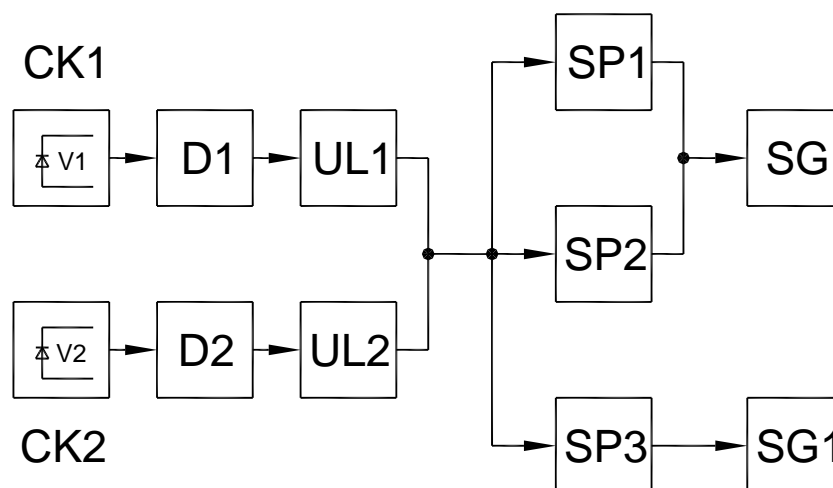
Rys. 2. Schemat elektryczny ideowy maszyny górniczej [opracowanie własne na podstawie [4]]



Na schemacie blokowym przedstawionym na rysunku 3 można wyodrębnić podsystemy:

- SRP/CS1 – złożony z członów końcowych CK1, CK2, wyłączników zatrzymania awaryjnego D1 i D2,
- SRP/CS2 – złożony z układów logicznych UL1 i UL2,
- SRP/CS3 złożony z przekaźników SP1 – SP3 oraz styczników SG i SG1.

Ze schematu elektrycznego ideowego wyodrębniono układ bezpieczeństwa zatrzymania awaryjnego, którego schemat blokowy przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat blokowy układu bezpieczeństwa [opracowanie własne na podstawie [4]]

gdzie:

D1 – styki wyłączników awaryjnych WA1 – WA3, kanału 1,

D2 – styki wyłączników awaryjnych WA1 – WA3, kanału 2,

UL1 – układ logiczny – iskrobezpieczny przekaźnik sterujący F18, kanał 1,

UL2 – układ logiczny – iskrobezpieczny przekaźnik sterujący F19, kanał 2,

SP1 – układ wyjściowy – przekaźnik pomocniczy K18 sterujący pracą stycznika K11 w skrzyni aparaturowej W, załączany szeregowo połączonymi stykami układu logicznego UL1 i UL2,

SP2 – układ wyjściowy – przekaźnik pomocniczy K19 sterujący pracą stycznika K11 w skrzyni aparaturowej W, załączany szeregowo połączonymi stykami układu logicznego UL1 i UL2,

SP3 – układ wyjściowy – przekaźnik pomocniczy K20 sterujący pracą stycznika K15 wyłącznika liniowego W1, załączany szeregowo połączonymi stykami układu logicznego UL1 i UL2,

SG – układ wyjściowy – stycznik załączający K11 skrzyni aparaturowej W, załączany szeregowo połączonymi stykami przekaźników pomocniczych SP1 i SP2,

SG1 – układ wyjściowy – stycznik podający napięcie zasilania do skrzyni aparaturowej W (wyłącznik liniowy) załączany stykiem przekaźnika pomocniczego SP3,

CK1 – człon końcowy montowany w łączniku WA1, złożony z diody V1, kanał 1,

CK2 – człon końcowy montowany w łączniku WA1, złożony z diody V2, kanał 2.

Po zadziałaniu (rozwarciu styków) wyłączników awaryjnych i/lub WA1 – WA3 następuje zatrzymanie maszyny (hamowanie realizowane poprzez silniki hydrauliczne lub hamulec mechaniczny). Po odblokowaniu łącznika wyłącznika zatrzymania i/lub WA1 – WA3 jest możliwe ponowne uruchomienie maszyny poprzez układ sterownia.

Po przeprowadzeniu obliczeń i wykazaniu zgodności założonego poziomu zapewnienia bezpieczeństwa osiągnięto następujące stany:

- wyeliminowano zagrożenia związane z ruchem maszyny dzięki odpowiednim rozwiązaniom konstrukcyjnym systemu sterowania,
- porównanie zastosowanego rozwiązania z innymi maszynami pozwala na stwierdzenie, że ryzyko związane z zastosowaniem przedmiotowego systemu sterowania zostało zredukowane,
- podjęte działania pozwalają stwierdzić, że maszyna zapewnia bezpieczeństwo użytkownika wyrobu w rozumieniu normy PN-EN ISO 12100-2:2012 [5],
- uznaniu, że sposoby postępowania, których należy przestrzegać podczas użytkowania maszyny powinny być zgodne z możliwościami pracowników obsługi,
- zalecane sposoby pracy zapewniające bezpieczeństwo podczas użytkowania powinny być umieszczone w instrukcji obsługi maszyny.

Podjęte działania mające na celu zmniejszenie ryzyka i pozytywny wynik porównania ryzyka pozwala stwierdzić, że maszyna zapewnia bezpieczeństwo użytkownika wyrobu w rozumieniu normy PN-EN ISO 12100-2:2012 [5].

#### **4. Walidacja funkcji bezpieczeństwa zatrzymania awaryjnego**

Walidacja funkcji bezpieczeństwa polega na sprawdzeniu realizacji funkcji we wszystkich stanach pracy, badaniach funkcjonalnych, sprawdzeniu architektury systemu, kategorii, poprawności montażu i konserwacji oraz zgodności elementów z dokumentacją techniczną układu sterowania.

Na etapie badania maszyny należy dodatkowo sprawdzić układ pod kątem kompatybilności elektromagnetycznej [7].

W systemie sterowania realizującym funkcja bezpieczeństwa zastosowano wypróbowane i pewne elementy, a redundantny układ pozwala na osiągnięcie wysokiego poziomu zapewnienia bezpieczeństwa PL.

#### **5. Podsumowanie**

Proces zmniejszenia ryzyka poprzez zastosowanie funkcji bezpieczeństwa zatrzymania awaryjnego zakończono po wyeliminowaniu zagrożeń związanych z ruchem maszyny poprzez zastosowanie odpowiedniego obwodu sterowania [2].

Przedstawiony opis funkcji bezpieczeństwa oraz schemat blokowy układu sterowania realizujący funkcje bezpieczeństwa wynikający z przeprowadzonej oceny ryzyka, pozwala na stwierdzenie, że:

- funkcja bezpieczeństwa zatrzymania awaryjnego jest funkcją maszyny, której uszkodzenie powoduje bezpośredni wzrost ryzyka,
- funkcja bezpieczeństwa jest realizowana przez układ sterowania maszyny,
- funkcji bezpieczeństwa powinien być przypisany poziom dopuszczalnego ryzyka wyrażony, zgodnie z normą PN-EN ISO 13849-1:2016-02 [6], poziomem zapewnienia bezpieczeństwa.

Osiągany poziom zapewnienia bezpieczeństwa jest zależny od architektury układu sterowania i elementów, które muszą być trwałe, wysokiej jakości, dużej niezawodności oraz dostosowane do warunków środowiska pracy.



W przypadkach związanych z ruchem maszyny, istotny wkład na zmniejszenie ryzyka ma zdefiniowana funkcja bezpieczeństwa, w postaci zatrzymania awaryjnego – „Zatrzymanie niebezpiecznych ruchów maszyny po naciśnięciu przycisku bezpieczeństwa wyłączników zatrzymania awaryjnego i uniemożliwienie ponownego ich uruchomienia do czasu odblokowania tych przycisków”. Po zainicjowaniu polecenia zatrzymania awaryjnego, stan wyłączenia jest utrzymywany przez przyciski z ryglowaniem, do momentu stworzenia bezpiecznych warunków pracy. Przywrócenie stanu pierwotnego funkcji bezpieczeństwa następuje poprzez zresetowanie systemu sterowania. Anulowanie polecenia zatrzymania awaryjnego jest potwierdzane osobną, zamierzoną i ręcznie wykonaną czynnością. Układ sterowania realizujący funkcję bezpieczeństwa zatrzymania awaryjnego jest z reguły redundantny (dwukanałowy).

Podczas projektowania układu sterowania związanego z zatrzymaniem awaryjnym maszyny należy:

- uwzględnić wszystkie jego elementy tak, aby mogły wzajemnie ze sobą współpracować,
- rozmieszczenie łączników powinno uwzględniać do nich dostęp osobom związanym ze stanowiskiem pracy,
- zapewnić dopasowanie sygnałów sterujących do parametrów pracy obwodu elektrycznego,
- zapewnić kompatybilność, dla poszczególnych elementów systemu sterowania oraz ich odporność na drgania i na warunki środowiskowe poprzez prawidłowy ich dobór,
- uwzględnić aktualne przepisy, zalecenia i wytyczne z zakresu bezpieczeństwa użytkowania.

## Literatura

- [1] Figiel A.: Bezpieczeństwo funkcjonalne układów sterowania maszyn górniczych, *Maszyny Górnicze* 2014 nr 4, ISSN 0209-3693
- [2] Majewski M.: Identyfikacja zagrożeń, jako jeden z elementów procesu projektowania maszyn górniczych, *Maszyny Górnicze* 2017 nr 3
- [3] Majewski M.: Konfiguracja obwodów sterowania i jej wpływ na bezpieczeństwo maszyn górniczych. Część 1, Funkcje bezpieczeństwa, *Maszyny Górnicze* 2018 nr 1, ISSN 2450-9442
- [4] Wytyczne dotyczące obwodów sterowania oraz wpływ ich konfiguracji na bezpieczeństwo maszyn górniczych – Opracowanie ITG KOMAG 2017 (materiały niepublikowane)
- [5] PN-EN ISO 12100:2012 Bezpieczeństwo maszyn – Ogólne zasady projektowania – Ocena ryzyka i zmniejszanie ryzyka
- [6] PN-EN ISO 13849-1:2016-02 Bezpieczeństwo maszyn – Elementy systemów sterowania związane z bezpieczeństwem – Część 1: Ogólne zasady projektowania
- [7] PN-EN ISO 13849-2:2005 Bezpieczeństwo maszyn – Elementy systemów sterowania związane z bezpieczeństwem – Część 2: Walidacja