

Konfigurowanie obwodów sterowania w celu zwiększenia bezpieczeństwa pracy maszyn górniczych

Część 1. Funkcje bezpieczeństwa

mgr inż. Marek Majewski
Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Configuring the control circuits to increase safety of mining machines Part 1. Safety functions

Streszczenie:

W artykule zidentyfikowano funkcje bezpieczeństwa minimalizujące ryzyko związane z zagrożeniami oraz zaproponowano sposób doboru systemów sterowania do ich realizacji. Funkcje bezpieczeństwa realizują funkcje załączenia, wyłączenia, zatrzymania maszyny oraz zatrzymania awaryjnego maszyny. W świetle wymagań dotyczących funkcji bezpieczeństwa wyznacza się architekturę oraz wymagany poziom zapewnienia bezpieczeństwa PLr poprzez systemy sterowania. Określenie wymagań jest pomocne przy wykonywaniu oceny ryzyka oraz przy opracowywaniu dokumentacji technicznej projektowanej maszyny górniczej.

Abstract:

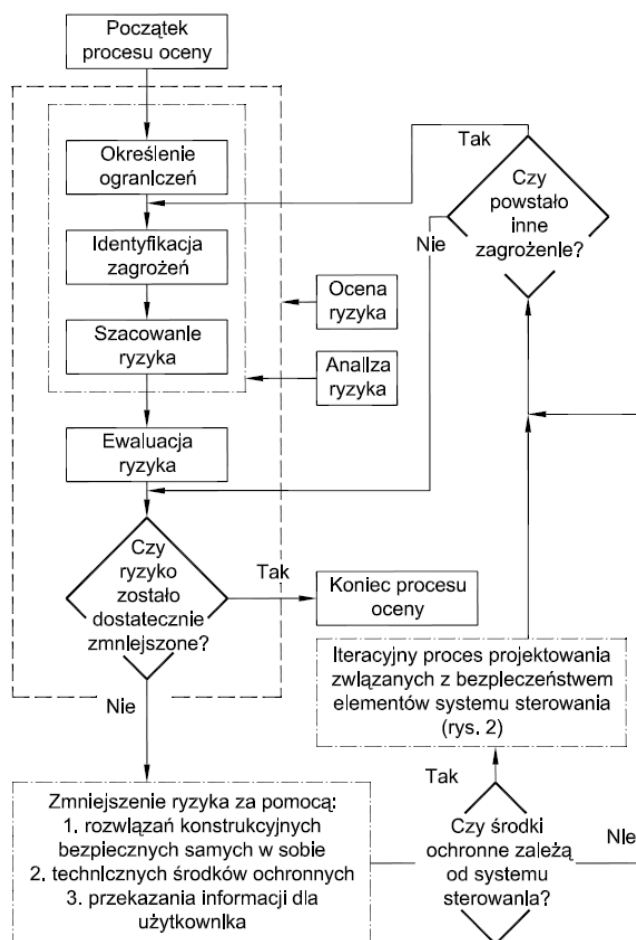
Safety functions minimizing the risk of hazards are identified and the method for selecting the control systems to realize these functions is suggested. Safety functions switch off and stop the machine as well as they stop the machine in the case of emergency. Structure and PLr safety level of the control system are determined in the light of safety functions requirements. Determination of requirements is helpful in risk assessment as well as during preparation of technical documentation of the designed machine.

Słowa kluczowe: górnictwo, ocena ryzyka, elektrotechnika, bezpieczeństwo, systemy sterowania

Keywords: mining, risk assessment, electrical engineering, security, control system

1. Wprowadzenie

Istotną sprawą przy projektowaniu maszyn jest stosowanie rozwiązań konstrukcyjnych i technicznych redukujących ryzyka związane z występującymi zagrożeniami do akceptowalnego poziomu [1]. Zagrożenia występują we wszystkich etapach życia maszyny i są identyfikowane poprzez przeprowadzenie oceny ryzyka. Pozwala ona na określenie sposobów ograniczenia ryzyka oraz na stwierdzenie, że może być ono dostatecznie zmniejszone np. poprzez zastosowanie między innymi odpowiednich systemów sterowania. Podjęcie decyzji o redukcji ryzyka następuje na podstawie oceny zagrożenia związanego z jego działaniem. Proces oceny oraz redukcji ryzyka poprzez zastosowanie systemów sterowania przedstawiono na rys. 1. Proces ten jest przeprowadzany w oparciu o normy PN-EN ISO 12100:2012 [8] oraz PN-EN ISO 13849-1:2016-02 [9]. Należy podkreślić, że w maszynach górniczych są stosowane obwody sterowania maszyny o różnym stopniu złożoności, konfiguracji i konstrukcji, przystosowane do pracy w warunkach zagrożenia wybuchem gazu i/lub pyłu palnego zgodnie z wymaganiami zawartymi w dyrektywie maszynowej [6] oraz w dyrektywie ATEX [7].

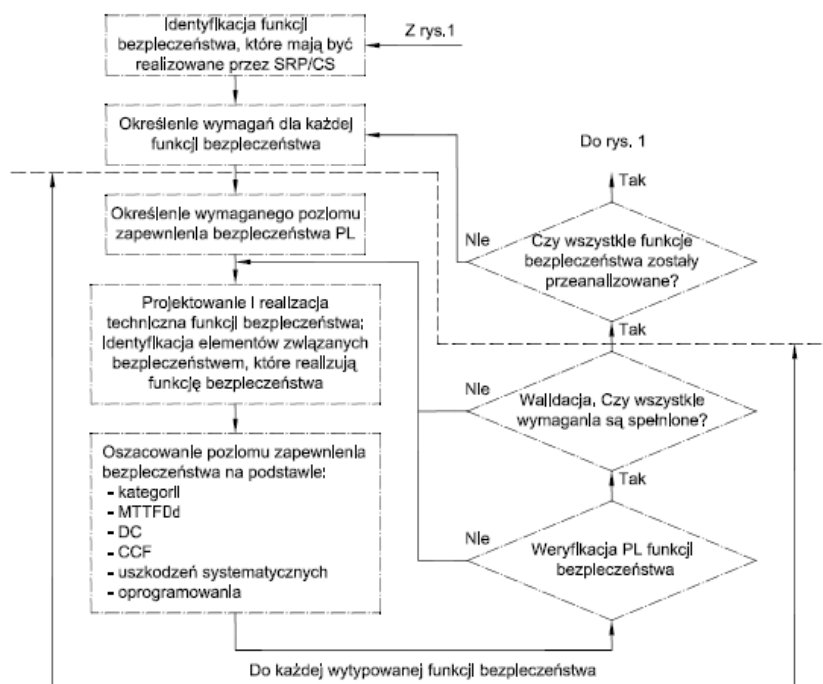


Rys. 1. Proces oceny oraz redukcji ryzyka [opracowanie własne na podstawie [9]]

Elementy systemu sterowania realizują następujące funkcje [5]:

- działanie maszyny w czasie normalnej pracy – załączanie i wyłączenie,
- kontrolowanie poprzez pomiary wartości parametrów decydujących o bezpieczeństwie,
- zatrzymanie awaryjne maszyny.

Proces projektowania systemu sterowania polega na wielokrotnym doborze elementów realizujących funkcję bezpieczeństwa w celu określenia udziału określonej funkcji bezpieczeństwa w procesie zmniejszenia ryzyka. Osiągnięcie zadawalającego poziomu zapewnienia bezpieczeństwa leży w gestii projektanta – rysunek 2.



Rys. 2. Iteracyjny proces projektowania związany z bezpieczeństwem elementów systemów sterowania [opracowanie własne na podstawie [9]]

Elementy systemu sterowania związane z bezpieczeństwem SRP/CS składają się z:

- zespołów wejściowych, inicjujących sygnał związany z bezpieczeństwem ,
- układów logicznych, przetwarzających sygnał wejściowy,
- zespołów wyjściowych, generujących wyjściowy sygnał bezpieczeństwa.

2. Funkcje bezpieczeństwa realizowane przez systemy sterowania

Podczas projektowania maszyn górniczych wymagane jest określenie zdolność systemów sterowania do zmniejszenia ryzyka oraz zapewnienie akceptowalnego poziomu bezpieczeństwa, a następnie porównanie go z wynikającym z oceny ryzyka i prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzeń niebezpiecznych. Przyjęto następujące określenia zgodne z normą [9]:

- poziom zapewnienia bezpieczeństwa PL – poziom dyskretny służący do określenia zdolności związanych z bezpieczeństwem elementów systemów sterowania do realizacji funkcji bezpieczeństwa w dających się przewidzieć warunkach,
- wymagany poziom zapewnienia bezpieczeństwa PLr – poziom zapewnienia bezpieczeństwa PL niezbędny do uzyskania wymaganego zmniejszenia ryzyka dla każdej funkcji bezpieczeństwa.

Wymagany poziom zapewnienia bezpieczeństwa dzieli się na pięć poziomów od PLa do PLe (PLa, PLb, PLc, PLd, PLe). Osiągnięcie wymaganego poziomu jest zależne od uzyskanych wielkości parametrów przedstawionych na rysunku 4 oraz w tabeli 1 niniejszego artykułu.

2.1. Funkcje bezpieczeństwa

Podczas procesu oceny ryzyka jest dokonywana identyfikacja możliwych do przewidzenia zagrożeń, niebezpiecznych sytuacji i/lub zdarzeń, we wszystkich etapach życia maszyny oraz podejmowane są decyzje o sposobach ich eliminacji [3]. Identyfikacja zagrożeń jest przeprowadzona na podstawie zapisów normowych dotyczących bezpieczeństwa. Normy dotyczące danej grupy maszyn w sposób ścisły określają jakie wymagania powinny być spełnione. Z kolei normy dotyczące wyposażenia elektrycznego określają wymagania dotyczące osłon i parametrów obwodów elektrycznych.

Spełnienie wymagań oraz doświadczenie projektanta pozwalają na eliminację zagrożeń już na etapie projektowania. Zidentyfikowane są zagrożenia, których minimalizacja jest przeprowadzana według zaleceń normy PN-EN ISO 121000:2012 [8]. Osiąga się to poprzez dobór cech konstrukcyjnych maszyny oraz poprzez dobór funkcji reagowania maszyny na zagrożenia, zwanych funkcjami bezpieczeństwa. Zgodnie z normą PN-EN ISO 13849-1:2016 [9] do funkcji bezpieczeństwa realizowanych za pomocą elementów systemów sterowania SRP/CS należą:

- załączanie z podtrzymaniem – podtrzymanie działania przycisku załączenia poprzez styk pomocniczy stycznika wykonawczego włączonego do obwodu sterowania (oddzielny przycisk realizuje przerywanie obwód sterowania),
- wyłączenie i zatrzymanie – realizowane przez techniczne środki ochronne zapobiegające przekroczeniu przez maszynę założonych parametrów technicznych, np. czujniki temperatury uzwojeń i łożysk silnika elektrycznego oraz temperatury i poziomu oleju hydraulicznego (sygnał zatrzymania, po zainicjowaniu przez techniczny środek ochronny, powinien być utrzymany aż do wystąpienia bezpiecznych warunków do ponownego uruchomienia – kasowanie sygnału zatrzymania jest potwierdzone oddzielnym, ręcznym i zamierzonym działaniem),
- uruchomienie lub ponowne uruchomienie – przeprowadzane w sposób zamierzony przez przyciśnięcie przycisku załączenia w pulpicie sterowniczym (w przypadku zainicjowania sygnału wyłączenia poprzez techniczny środek ochronny ponowne uruchomienie jest możliwe po zaniku przyczyny wyłączenia),
- uruchamianie lub ponowne uruchomienie – po nadaniu sygnału ostrzegawczego podczas uruchamiania a proces uruchamiania odbywa się w określonym czasie,
- sterowanie lokalne – załączanie i wyłączenie – możliwe do realizacji, po wybraniu specjalnym łącznikiem w pulpicie lub skrzyni aparaturowej maszyny (ten sposób sterowania wymaga wzajemnego blokowania innych rodzajów sterowania przy załączaniu maszyny),
- sterowanie za pomocą urządzeń zezwalających – ustawienie łączników w konkretnym położeniu umożliwia załączenie obwodu sterowania (do urządzeń zezwalających należą odłącznik oraz łączniki wyboru rodzaju sterowania),
- zapobieganie nieoczekiwanemu uruchomieniu poprzez stosowanie przekaźników sterowniczych charakteryzujących się:
 - współdziałaniem z członem końcowym obwodu sterowania, którym jest przeważnie dioda prostownicza, zapobiegającym załączeniu na skutek zwarcia w obwodzie sterowniczym,
 - odpornością na przerwę w zasilaniu i wahaniu napięcia zasilającego,
 - kontrolą rezystancji izolacji obwodu sterowania,

- odłączanie i rozpraszanie nagromadzonej energii, odłączanie maszyny od źródeł energii oraz stosowanie rozdzielaczy elektrohydraulicznych, rozładowujących obwód hydrauliczny, poprzez kierowania oleju pod ciśnieniem na spływ, do zbiornika oleju,
- sposoby sterowania i jego wyboru poprzez :
 - projektowanie i umieszczanie urządzeń sterowniczych, zgodnie z zasadami ergonomii,
 - umieszczanie urządzeń zatrzymywania w pobliżu urządzenia sterującego uruchomieniem,
 - umieszczanie ręcznych elementów sterowniczych poza strefami niebezpiecznymi w miejscu, z którego operator może obserwować strefę roboczą,
 - efekt sterowniczy powinien być osiągnięty przez celowe działanie,
 - kontrolę obecności operatora na stanowisku pracy,
 - kontrolę zasięgu przenośnych urządzeń sterowniczych,
 - wybór tylko jednego urządzenia sterowania (w przypadku wyposażenia maszyny w kilka urządzeń),
- wzajemne blokowanie oddziaływania różnych elementów systemów sterowania związanych z bezpieczeństwem,
- monitorowanie parametryzacji, wartości wejściowych dokonywanych za pomocą specjalistycznych przekaźników zabezpieczających (zabezpieczenie zwarciove, przeciążeniowe oraz kontroli ciągłości przewodu uziemiającego),
- elementy i części realizujące funkcję zatrzymania awaryjnego, utrzymujące napęd w stanie zatrzymania, do momentu skasowania sygnału z miejsca inicjacji (skasowanie umożliwia ponowne uruchomienie maszyny – uzupełniające środki ochronne).

Należy podkreślić, że w maszynach górniczych:

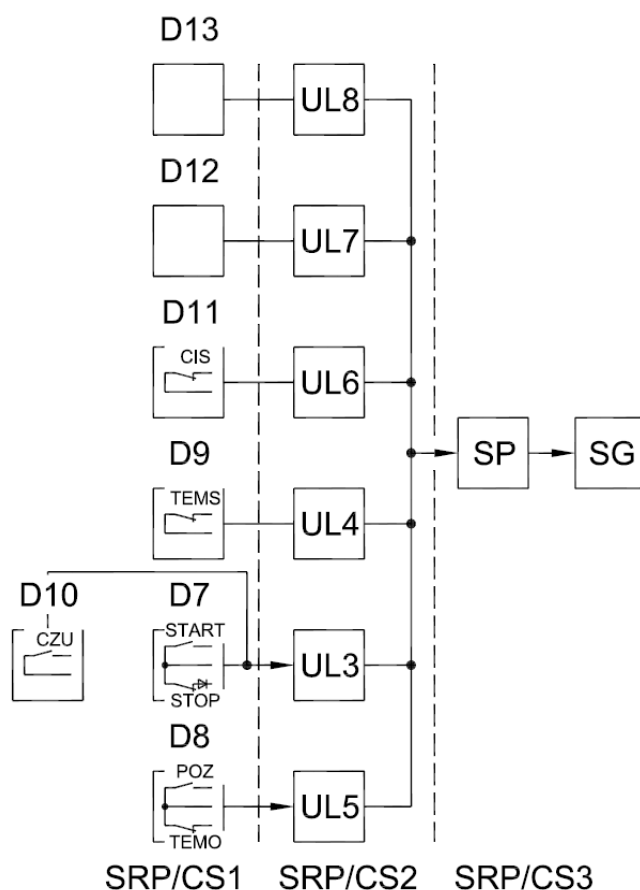
- obwody sterowania i kontroli są obwodami iskrobezpiecznymi kat. Ib,
- obwody iskrobezpieczne kat. Ib są prowadzone osobnymi kablami lub przewodami z zachowaniem rozdzielania obwodów, dla różnych napięć iskrobezpiecznych,
- obwody nieiskrobezpieczne są wyposażone w kontrolę upływową oraz prowadzone osobnymi przewodami lub kablami, pomiędzy osłonami ognioszczelnymi,
- obwody siłowe posiadają zabezpieczenia przed skutkami zwarcia, przeciążeń oraz obniżania się rezystancji izolacji,
- urządzenia pracują w temperaturze otoczenia od -20°C do $+40^{\circ}\text{C}$, przy wilgotności względnej do 95%,
- urządzenia są przewidziane do pracy w pomieszczeniach zagrożonych wybuchem gazu i/lub pyłu węglowego,
- zachowane są właściwe odstępki izolacyjne powierzchniowe i w powietrzu,
- stosowane są wyjścia kompatybilne z innymi układami.

2.2. Układ sterowania

Przykładowy schemat blokowy układu sterowania maszyny realizujący funkcje sterownicze oraz funkcje bezpieczeństwa przedstawiono na rysunku 3.

Układ taki jest najczęściej spotykany w rozwiązaniach maszyn górniczych. Pełni on następujące funkcje:

- załączanie maszyny łącznikiem START, umieszczonym w łączniku D7,
- wyłączenia maszyny łącznikiem STOP, umieszczonym w łączniku D7,
- kontrola parametrów pracy maszyny – czujnik D8, pomiar poziomu POZ i temperatury oleju hydraulicznego TEMO w zbiorniku,
- kontrola temperatury silnika – czujnik D9 – pomiar temperatury uzwojeń silnika TEMS, oraz ciągłości przewodu uziemiającego silnik elektryczny,
- kontrola obecności obsługującego na stanowisku pracy – czujnik D10, łącznik CZU,
- zabezpieczenie zwarciove i przeciążeniowe – przetwornik prądu D12 i przekaźnik zabezpieczeniowy UL7,
- zabezpieczenie upływowe – układ pomiarowy D13 przekaźnika kontroli parametrów przewodów zasilających UL8,
- załączanie sygnalizacji ostrzegawczej przy jeździe do tyłu – czujnik ciśnienia oleju D11, łącznik CIS,



Rys. 3. Schemat blokowy układu sterowania SPR/CS [opracowanie własne na podstawie [5]]

gdzie:

SRP/CS1 – układ wejściowy systemu sterowania,

SRP/CS2 – układ logiczny systemu sterowania,

SRP/CS3 – układ wyjściowy systemu sterowania,

D7-D13 – czujniki i łączniki,

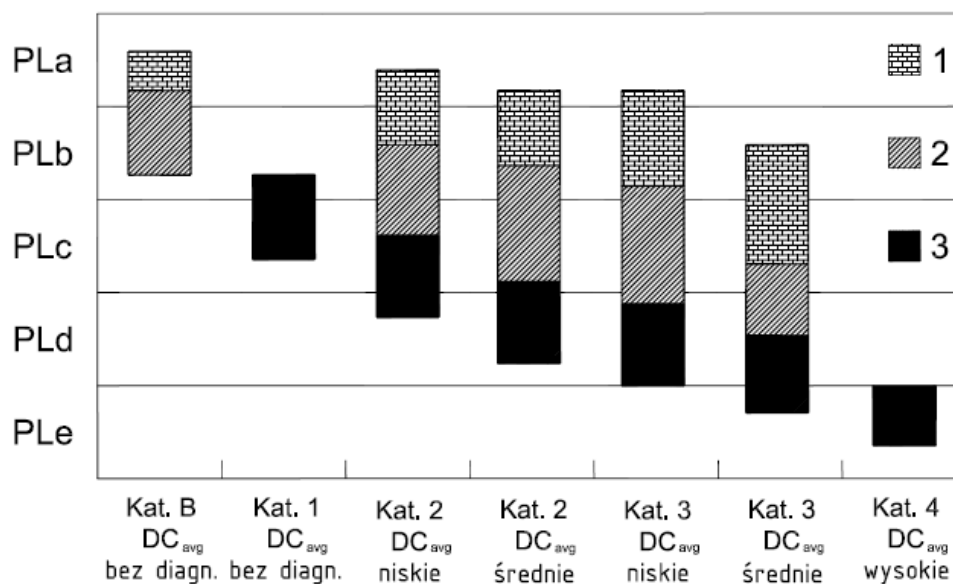
UL3-UL8 – układ logiczny – przekaźniki sterujące,

SP – układ wyjściowy – stycznik lub przekaźnik pomocniczy,
 SG – układ wyjściowy – stycznik główny załączany przez układy logiczne UL3-UL8.

Czujniki i łączniki współpracują z układami logicznymi UL3-UL8 (przekaźniki sterujące lub zabezpieczające), które sterują poprzez szeregowo połączone styki, układem wyjściowym – przekaźnikiem pomocniczym SP i stycznikiem SG.

2.3. Parametry układu sterowania realizującego funkcje bezpieczeństwa

Przeprowadzając ocenę ryzyka należy identyfikować zagrożenia związane z pracą maszyną oraz podjąć decyzje mające na celu ich eliminację. Część zagrożeń i ryzyko związane z nimi jest zmniejszane przez funkcje bezpieczeństwa realizowane przez system sterowania SRP/CS. Proces redukcji obejmuje tylko tę część ryzyka, która jest zmniejszana przez daną funkcję bezpieczeństwa, realizowaną przez elementy systemu sterowania. Każda funkcja bezpieczeństwa jest realizowana przez część systemu sterowania i powinna być rozpatrywana osobno, po przypisaniu do niej wejść, jednostek logicznych i wyjść.



Rys. 4. Zależność między kategoriami, DC_{avg} i $MTTF_D$ każdego kanału a PLr
 [opracowanie własne na podstawie [9]]

gdzie:

PL – poziom zapewnienia bezpieczeństwa,

PLr – wymagany poziom zapewnienia bezpieczeństwa (PLa – PLe),

$MTTF_D$ – spodziewany średni czas do niebezpiecznego uszkodzenia kanału lub elementu,

DC_{avg} – średnie pokrycie diagnostyczne – stosunek intensywności wykrytych uszkodzeń niebezpiecznych do intensywności wszystkich uszkodzeń niebezpiecznych,

1 – $MTTF_D$ – każdego kanału lub elementu – niski ($3 \text{ lata} \leq MTTF_D < 10 \text{ lat}$),

2 – $MTTF_D$ – każdego kanału lub elementu – średni ($10 \text{ lat} \leq MTTF_D < 30 \text{ lat}$),

3 – $MTTF_D$ – każdego kanału lub elementu – wysoki ($30 \text{ lat} \leq MTTF_D \leq 100 \text{ lat}$).

Zdefiniowanym funkcjom bezpieczeństwa powinna być przypisana co najmniej jedna z pięciu kategorii wyszczególnionych w normie PN-EN ISO 13849:2016-02 [9]. Kategorie są podstawowymi parametrami stosowanymi do określenia poziomu zapewnienia

bezpieczeństwa PLr przez system sterowania SRP/CS i określają odporność na defekty systemu SRP/CS. Na rys.3 przedstawiono realizację każdej funkcji bezpieczeństwa w oparciu o strukturę jednokanałową, której może być przypisana kategoria B lub kategoria 1.

Kategorie określają zatem wymagane zachowanie się systemu sterowania SRP/CS pod względem jego odporności na defekty. Wystąpienie defektów może spowodować utratę funkcji bezpieczeństwa. Kategoria B jest kategorią podstawową. W kategorii 1 osiąga się poprawę odporności na defekty poprzez dobór wypróbowanych elementów składowych o wysokiej jakości i sposobu ich stosowania. W kategorii 2 sprawdza się okresowo, czy jest realizowana funkcja bezpieczeństwa (układ testujący). Kategorie 3 i 4 osiąga się po spełnieniu warunku, że pojedynczy defekt nie powoduje utraty funkcji bezpieczeństwa. W kategorii 4 dodatkowo defekty są wykrywane w czasie wystarczającym do uniknięcia utraty funkcji bezpieczeństwa.

Uproszczona procedura wyznaczania PL osiąganego przez SRP/CS – na podstawie tablicy 6 normy PN-EN ISO 13849-1:2016-02 [9]

Tabela 1

Kategoria	B	1	2	2	3	3	4
DC_{avg}	bez diagnostyki	bez diagnostyki	niskie	średnie	niskie	średnie	wysokie
$MTTF_D$ każdego kanału							
niski	PLa	nie stosuje się	PLa	PLb	PLb	PLc	nie stosuje się
średni	PLb	nie stosuje się	PLb	PLc	PLc	PLd	nie stosuje się
wysoki	nie stosuje się	PLc	PLc	PLd	PLd	PLd	PLe

Przedstawione na rysunku 4 oraz w tabeli 1 zależności, pomiędzy kategoriami, pokryciem diagnostycznym a średnim czasem do niebezpiecznego uszkodzenia kanału, pozwalają na oszacowanie, czy układy sterowania kategorii 1 osiągną maksymalnie poziom zapewnienia bezpieczeństwa PLc, pod warunkiem, że:

- zastosowano układy znane i powszechnie używane w maszynach górniczych, które sprawdzają się oraz są niezawodne,
- użyto, jako części składowych systemu sterowania, elementów wysokiej jakości oraz dostosowanych do pracy w warunkach podziemnych zakładów górniczych – elementy wypróbowane,
- zapewniono odpowiednie środki ochronne elementów przed zniszczeniem – wykluczenie defektu.

3. Wyznaczenie średniego czasu do niebezpiecznego uszkodzenia $MTTF_D$ elementów składowych kanału systemu sterowania

W rozdziale 2 przyjęto, że każda funkcja bezpieczeństwa realizowana przez jednokanałowy system sterowania może zapewnić maksymalnie poziom bezpieczeństwa PLC. Każdą funkcję bezpieczeństwa można zatem rozpatrywać osobno według schematu blokowego przedstawionego na rysunku 3. W niniejszym przykładzie jest rozważana funkcja wyłączenia eksploatacyjnego maszyny wg rysunku 3.

3.1. Określenie wymagań strukturalnych dla łącznika STOP z układu sterowania

Podsystem wejściowy SRP/CS1 składa się z łącznika STOP wyłączenia eksploatacyjnego maszyny (wyłączenie maszyny wynikające ze sposobu prowadzenia prac górniczych).

Średni czas między uszkodzeniami niebezpiecznymi dla łącznika wyłączenia D8 można określić na podstawie właściwości (1):

$$MTTF_{dD8} = \frac{B_{10d}}{0,1n_{op}} \text{ [lata]} \quad (1)$$

gdzie:

$MTTF_{dD8}$ – średni czas między uszkodzeniami niebezpiecznymi dla wyłączenia STOP łącznika D8,

B_{10d} – przyjęto 100000 cykli łączeń, po których 10% urządzeń uległo uszkodzeniu, w tym 20% to uszkodzenia niebezpieczne (jakakolwiek usterka powoduje wzrost zagrożenia – przyjęto na podstawie tabeli C.1 normy PN-EN ISO 13849-1:2016-02) [9],

n_{op} – liczba załączeń na rok określana przez użytkownika na podstawie zależności (2):

$$n_{op} = \frac{d_{op} h_{op} 3600}{t_{cycle}} \text{ [cykl/rok]} \quad (2)$$

gdzie:

d_{op} – średni czas pracy w dniach na rok – przyjęto 220 dni na rok,

h_{op} – średni czas pracy w godzinach na dzień – przyjęto 16 godzin na dobę,

t_{cycle} – średni czas między początkami dwóch kolejnych cykli pracy elementu – przyjęto 30 łączeń na godzinę (120 s na cykl).

Uwzględniając powyższe wyznacza się:

$$n_{op} = \frac{220 \times 16 \times 3600}{120} = 105600 \text{ cykli/rok}$$

a następnie:

$$MTTF_{dD1} = \frac{100000}{0,1 \times 105600} = 9,47 \text{ lata}$$

Osiągnięto średni czas między uszkodzeniami niebezpiecznymi dla łącznika STOP poniżej 10 lat, co pozwala ocenić jego poziom jako **niski**.

Producenci nie podających w katalogach danych niezbędnych do przeprowadzenia powyższych obliczeń, stąd konieczność przyjmowania ich na podstawie tabel zawartych w nomie [9].

3.2. Określenie wymagań strukturalnych dla układu logicznego UL3 systemu sterowania

Według opracowania [5] dla przekaźnikowego modułu sterującego UL3 przyjęto średnie prawdopodobieństwo uszkodzenia niebezpiecznego na godzinę $PFH_D=55,5 \cdot 10^{-9}$.

Średni czas między uszkodzeniami niebezpiecznymi dla przekaźnikowego modułu sterującego UL3 można wyznaczyć na podstawie zależności (3):

$$MTTF_{dUL3} = \frac{1}{\lambda_D} \text{ [lata]} \quad (3)$$

gdzie:

$MTTF_{dUL3}$ – średni czas między uszkodzeniami niebezpiecznymi dla przekaźnikowego modułu sterującego UL3,

λ_D – stała intensywność uszkodzeń niebezpiecznych – przyjęto na podstawie wzoru C.7 normy PN-EN ISO 13849-1:2016-02 [9],

$$PFH_D = \lambda_D \cdot 1 \text{ godzina} \quad (4)$$

Przyjmując, że 1 rok = 8760 godzin:

$$MTTF_{dUL3} = \frac{10^9}{55,6 \cdot 8760} = 2053 \text{ lata}$$

Uzyskany średni czas między uszkodzeniami niebezpiecznymi dla przekaźnikowego modułu sterującego UL3 wynosi ponad 100 lat, co pozwala ocenić jego poziom jako **wysoki**.

3.3. Określenie wymagań strukturalnych dla przekaźnika pomocniczego SP systemu sterowania

Średni czas między uszkodzeniami niebezpiecznymi $MTTF_{dSP}$ dla przekaźnika pomocniczego obwodu bezpieczeństwa określa się na podstawie wzoru (1) i (2):

Przyjęto:

B_{10d} – równo 400000 cykli łączeń, po których 10% urządzeń uległo uszkodzeniu, w tym 20% stanowiły uszkodzenia niebezpieczne (jakakolwiek usterka może powodować wzrost zagrożenia – przyjęto na podstawie tabeli C.1 normy PN-EN ISO 13849-1:2016-02) [9],

n_{op} – liczba załączeń na rok (określana przez użytkownika):

d_{op} – średni czas pracy w dniach na rok – przyjęto 220 dni na rok,

h_{op} – średni czas pracy w godzinach na dzień – przyjęto 16 godzin na dobę,

t_{cycle} – średni czas między początkami dwóch kolejnych cykli pracy elementu – przyjęto 30 łączeń na godzinę (120 sekund na cykl).

Uwzględniając powyższe wyliczono:

$$n_{op} = \frac{220 \cdot 16 \cdot 3600}{120} = 105600 \text{ cykli/rok}$$

a następnie:

$$MTTF_{dsp} = \frac{400000}{0,1 \times 1761} = 38 \text{ lat}$$

Średni czas między uszkodzeniami niebezpiecznymi dla przekaźnika SP wynosi 38 lat, co pozwala ocenić jego poziom jako **wysoki**.

3.4. Określenie wymagań strukturalnych dla stycznika SG systemu sterowania

Średni czas między uszkodzeniami niebezpiecznymi $MTTF_{dSG}$ dla stycznika głównego SG można określić również na podstawie wzoru (1) i (2).

Przyjęto:

B_{10d} – 1300000 cykli łączeń, po których 10% urządzeń uległo uszkodzeniu, w tym 20% stanowiły uszkodzenia niebezpieczne (jakakolwiek usterka powoduje wzrost zagrożenia – przyjęto na podstawie tabeli C.1 normy PN-EN ISO 13849-1:2016-02) [9],

n_{op} – liczba załączeń na rok określana przez użytkownika:

d_{op} – średni czas pracy w dniach na rok – przyjęto 220 dni na rok,

h_{op} – średni czas pracy w godzinach na dzień – przyjęto 16 godzin na dobę,

t_{cycle} – średni czas między początkami dwóch kolejnych cykli pracy stycznika – przyjęto 30 łączeń na godzinę (120 s na cykl).

Uwzględniając, że w układzie są trzy wyłączniki zatrzymania awaryjnego, a cykl załączenia każdego z nich określono co 6 godzin, to stycznik SG jest dodatkowo pobudzony 3 cykle/6 godzin. Stąd:

$$MTTF_{dSG} = \frac{1300000}{0,1 \times 105600} = 123 \text{ lata}$$

Średni czas między uszkodzeniami niebezpiecznymi dla stycznika głównego SG wynosi ponad 100 lat, co pozwala ocenić jego poziom jako **wysoki**.

3.5. Określenie wypadkowych wymagań strukturalnych dla systemu sterowania

Średni czas między uszkodzeniami niebezpiecznymi dla systemu sterowania SRP/CS można wyznaczyć na podstawie zależności (4):

$$\frac{1}{MTTF_{dw}} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{MTTF_{di}} = \frac{1}{MTTF_{dD8}} + \frac{1}{MTTF_{dUL3}} + \frac{1}{MTTF_{dsp}} + \frac{1}{MTTF_{dSG}} \quad (4)$$

gdzie:

$MTTF_{dw}$ – średni czas między uszkodzeniami niebezpiecznymi uwzględniający współpracę łącznika wyłączenia eksploatacyjnego, układu logicznego, przekaźnika pomocniczego oraz stycznika głównego,

$MTTF_{di}$ – średni czas między uszkodzeniami niebezpiecznymi dla poszczególnych urządzeń,

$MTTF_{dD8}$ – średni czas między uszkodzeniami niebezpiecznymi dla łącznika D8,

$MTTF_{dUL3}$ – średni czas między uszkodzeniami niebezpiecznymi dla układu logicznego UL3,

$MTTF_{dSP}$ – średni czas między uszkodzeniami niebezpiecznymi dla przekaźnika pomocniczego SP,

$MTTF_{dSG}$ – średni czas między uszkodzeniami niebezpiecznymi dla stycznika.

Na podstawie wyliczenia wartości MTTF w pkt. 3.1÷3.4 wyznaczono:

$$\frac{1}{MTTF_{dW}} = \frac{1}{9,47} + \frac{1}{2053} + \frac{1}{38} + \frac{1}{123} = 0,140529584$$

$$MTTF_{dW} = 7,12 \text{ lata}$$

Średni czas między uszkodzeniami niebezpiecznymi dla systemu sterowania wynosi powyżej 7 lat, co pozwala ocenić jego poziom jako **niski**, zatem układowi sterowania można SRP/CS przypisać **kategorię B**.

4. Podsumowanie

Na podstawie obliczeń przedstawionych w pkt. 3 wyznaczono podstawową kategorię B systemu sterowania. Kategoria B jest wystarczająca pod warunkiem, że normy przedmiotowe dotyczące danej grupy maszyn nie stanowią inaczej. Poprawę odporności na defekty (wyższą kategorię) można osiągnąć poprzez dobór łącznika STOP o wyższej liczbie cykli łączeń lub poprzez organizację robót górniczych, która ograniczy liczbę załączeń i wyłączeń maszyny w ciągu 1 godziny.

Przedstawiony opis funkcji bezpieczeństwa w pkt. 2 wg schematu blokowego układu sterowania pokazanego na rysunku 3 realizuje funkcje bezpieczeństwa wynikające z oceny ryzyka. Uwzględniono w niej skutki analizowanego zagrożenia i prawdopodobieństwo zaistnienia zdarzenia zagrażającego [2]. Z powyższych rozważań wynika, że:

- funkcja bezpieczeństwa jest funkcją maszyny, której uszkodzenie powoduje bezpośredni wzrost ryzyka,
- funkcje bezpieczeństwa mogą być zrealizowane poprzez układ sterowania maszyny,
- bezpieczeństwo użytkownika maszyny zależy przede wszystkim od prawidłowego działania układu sterowania,
- każdej funkcji bezpieczeństwa powinien być przypisany poziom dopuszczalnego ryzyka wyrażony, zgodnie z normą PN-EN ISO 13849-1:2016-02 [9], wymaganym poziomem zapewnienia bezpieczeństwa PLr.

Proces zmniejszenia ryzyka poprzez zastosowanie funkcji bezpieczeństwa, realizowanych przez system sterowania kończy się po osiągnięciu następujących stanów:

- zagrożenia zostały wyeliminowane lub ryzyko zmniejszone dzięki odpowiednim rozwiązaniom konstrukcyjnym obwodów sterowania i obwodów zabezpieczeń,
- wykazanie, że ryzyko można zmniejszyć poprzez poprawę odporności na defekty w wyniku doboru elementów składowych systemu sterowania,
- uznanie, że systemy sterowania osiągną maksymalny wymagany poziom zapewnienia bezpieczeństwa PLc, kategorii 1 dla struktury jednokanałowej.

Przy projektowaniu systemu sterowania związanego z realizacją funkcji bezpieczeństwa należy:

- uwzględniać wszystkie elementy, tak aby mogły wzajemnie ze sobą współpracować,
- uwzględniać dostęp do łączników osobom związanym ze stanowiskiem pracy, nie tylko obsługującemu maszynę,
- zapewnić dopasowanie sygnałów sterujących do parametrów pracy obwodu elektrycznego,
- zapewnić kompatybilność, odporność na drgania i na warunki środowiskowe poprzez prawidłowy dobór wyposażenie elektrycznego,
- uwzględnić aktualne przepisy, zalecenia i wytyczne gwarantujące bezpieczeństwo w miejscu zainstalowania i użytkowania.

W części 1 artykułu określono funkcje bezpieczeństwa oraz sposoby ich realizacji poprzez układy sterowania maszyny. Zagrożenia związane z ruchem maszyny mogą być zredukowane przez zastosowanie układu zatrzymania awaryjnego [4]. Określenie wymaganych parametrów dla jego elementów zostanie przeprowadzone w drugiej części artykułu.

Literatura

- [1] Figiel A.: Ocena ryzyka w procesie projektowania maszyn i urządzeń przeznaczonych do stosowania w zakładach górniczych, Innowacyjne techniki i technologie dla górnictwa. Bezpieczeństwo – Efektywność, KOMTECH 2014, ITG KOMAG, Gliwice 2014 s.291-302, ISBN 978-83-60708-83-5
- [2] Figiel A.: Bezpieczeństwo funkcjonalne układów sterowania maszyn górniczych, Maszyny Górnicze 2014 nr 4
- [3] Majewski M.: Identyfikacja zagrożeń, jako jeden z elementów procesu projektowania maszyn górniczych, Maszyny Górnicze 2017 nr 3
- [4] Ocena ryzyka Spągłodowarka BH 3000 W16.058AH08 wydanie 3, Opracowanie ITG KOMAG 2017 (materiały niepublikowane)
- [5] Wytyczne dotyczące obwodów sterowania oraz wpływ ich konfiguracji na bezpieczeństwo maszyn górniczych – Opracowanie ITG KOMAG 2017 (materiały niepublikowane)
- [6] Dyrektywa 2006/42/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 17 maja 2006 r. w sprawie maszyn, zmieniająca dyrektywę 95/16/WE
- [7] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2014/34/UE z dnia 26 lutego w sprawie harmonizacji ustawodawstwa państw członkowskich odnoszących się do urządzeń i systemów ochronnych przeznaczonych do użytku w atmosferze wybuchowej
- [8] PN-EN ISO 12100:2012 Bezpieczeństwo maszyn – Ogólne zasady projektowania – Ocena ryzyka i zmniejszanie ryzyka
- [9] PN-EN ISO 13849-1:2016-02 Bezpieczeństwo maszyn – Elementy systemów sterowania związane z bezpieczeństwem – Część 1: Ogólne zasady projektowania