Leszek Kasprzyczak, Paweł Szwejkowski, Damian Nowak
Instytut Technik Innowacyjnych EMAG, Katowice
Maciej Cader, Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP, Warszawa

ANALIZA FUNKCJI BEZPIECZEŃSTWA I DOBÓR NAPĘDÓW DLA GÓRNICZEJ MOBILNEJ PLATFORMY INSPEKCYJNEJ

AN ANALYSIS OF THE SAFETY FUNCTION AND THE SELECTION OF DRIVES FOR A MINING MOBILE INSPECTION PLATFORM

Streszczenie: Scharakteryzowano poszczególne zespoły Mobilnej Platformy Inspekcyjnej z podaniem zastosowanych technik budowy przeciwwybuchowych. Metodami symulacyjnymi określono parametry bloków napędowych złożone z bezszczotkowych silników prądu stałego, przekładni walcowych i luzowników. Wyznaczono momenty sił na kołach przy pokonywaniu założonych przeszkód. Przedstawiono algorytm wyznaczania poziomu zapewnienia bezpieczeństwa PL funkcji zatrzymania awaryjnego. Funkcja zatrzymania awaryjnego zrealizowana została z wyłączników bezpieczeństwa, przekaźników i styczników odcinających zasilanie od indywidualnych akumulatorów.

Abstract: The particular parts of the Mobile Inspection Platform are characterized by applied explosion-proof techniques. The drive blocks parameters are determined by simulation methods. The drive blocks are composed of brushless DC motors, helical gears and brakes. The force moments on the wheels during the overcoming of assumed obstacles are determined by simulation methods. An algorithm of determination of the Performance Level of the emergency stop function is presented. The emergency stop function is realized by emergency stop switches, relays and contactors which switch off the power from individual batteries.

Słowa kluczowe: *inspekcyjny robot górniczy, funkcja zatrzymania awaryjnego, wyznaczanie parametrów napędów przez symulacje komputerowe*
Keywords: *inspection mining robot, emergency stop function, determination of drive parameters by computer simulations*

1. Wstęp

Mobilna Platforma Inspekcyjna (MPI) jest modelem opracowanym w ramach projektu pt. „Badanie i studium wykonalności modelu mobilnej platformy inspekcyjnej kategorii M1 z napędami elektrycznymi do stref zagrożonych wybuchem" realizowanego w Programie Badań Stosowanych przez konsorcjum naukowe, w skład którego wchodzi Instytut Technik Innowacyjnych EMAG oraz Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP. Na rys. 1 przedstawiono widok MPI w ćwiczebnym wyrobisku na terenie Centralnej Stacji Ratownictwa Górniczego S.A. (CSRG).

Rys. 1. Widok MPI w ćwiczebnym wyrobisku na terenie CSRG

2. Określenie ograniczeń maszyny

Mobilna Platforma Inspekcyjna (MPI) jest samobieżną maszyną o masie 1100 kg, poruszającą się z prędkością maksymalną do 0,7 m/s,

z zasięgiem do 1000 m i gabarytach: dł. 240 mm, szer. 115 mm, wys. 180 cm. MPI zasilana jest z akumulatorów elektrycznych (napięcia poniżej 42 VDC). Zespoły maszyny opracowane są według różnych technik budowy przeciwwybuchowej: korpusy wózków przedniego i tylnego oraz układarki światłowodu są ognioszczelne wg PN-EN 60079-1, wewnątrz nich umieszczono akumulatory główne budowy wzmocnionej wg PN-EN 60079-7 i budowy hermetyzowanej wg PN-EN 60079-18, bezszczotkowe silniki prądu stałego BLDC [1] budowy wzmocnionej, luzowniki i przekładnie walcowe budowy „o" wg PN-EN 60079-6, sterowniki silników budowy hermetyzowanej oraz styczniki budowy hermetyzowanej. W obudowie nadciśnieniowej wg PN-EN 60079-2 umieszczono kamerę kolorową i termowizyjną oraz układy zabezpieczające. Na rurowym stelażu znajdują się iskrobezpieczne kamery monochromatyczne wg PN-EN 60079-11 oraz lampy. W niebieskiej obudowie o IP 54 znajdują się iskrobezpieczne akumulatory i układy sterująco - pomiarowe. MPI przeznaczona jest do pracy w otamowanych wyrobiskach kopalń, tzn. w wyrobiskach odciętych od dostępu świeżego powietrza i wstępu personelu. MPI może być użytkowana w obecności ludzi w sytuacji jej transportowania przy pomocy środków transportu pionowego i poziomego infrastruktury kopalnianej. Dominującym kolorem pojazdu jest jaskrawy pomarańcz, który wybrano ze względów bezpieczeństwa i doskonałej widoczności nawet w słabym oświetleniu.

3. Identyfikacja zagrożeń

Podczas transportowania MPI przy pomocy kopalnianej infrastruktury istnieje możliwość wystąpienia szeregu zagrożeń takich jak: zgniecenie, złamania/zmiażdżenia kończyn, otarcia, przecięcia. Również podczas przejazdu MPI w towarzystwie personelu istnieje możliwość najechania kołem/kołami na kończyny dolne osoby znajdującej się w pobliżu pojazdu lub uderzenie osoby korpusem pojazdu w kończyny dolne. Towarzyszyć temu mogą zagrożenia zmiażdżeniem i złamaniem kończyn. Podobne zagrożenia możliwe są podczas prezentowania MPI na targach.

4. Oszacowanie ryzyka

Ryzyko związane z rozważanym zagrożeniem jest funkcją ciężkości szkody mogącej być skutkiem danego zagrożenia i prawdopodobieństwa wystąpienia tej szkody. Na prawdopodobieństwo wystąpienia tej szkody składają się następujące czynniki:

– częstość narażenia osób na zagrożenie,
– prawdopodobieństwo zaistnienia zdarzenia zagrażającego oraz
– możliwość uniknięcia lub ograniczenia szkody.

Ciężkość szkody dla zagrożeń związanych ze zgnieceniem, zmiażdżeniem/złamaniem kończyn jest duża (ciężka). Jednakże wyposażenie pojazdu w odpowiednie komponenty ułatwiające transport (zaczepy, śruby oczkowe itp.) umożliwia transport z wykorzystaniem suwnic, dźwigów i wózków widłowych. W celu zminimalizowania ryzyka podczas transportowania istotne jest przestrzeganie przez operatorów przepisów BHP danego stanowiska pracy. W takim przypadku prawdopodobieństwo wystąpienia szkody jest niskie. W celu uniknięcia zagrożeń związanych z przecięciem ostrymi krawędziami i narożami, krawędzie blach zostały stępione i wyrównane, a naroża zaokrąglone. Również podczas jazdy MPI potencjalna ciężkość szkody jest duża. Jednakże prawdopodobieństwo wystąpienia tej szkody jest niskie, ponieważ częstość narażenia osób jest niska (operator MPI podczas sterowania ruchem znajduje się w bezpiecznej odległości kilku metrów za platformą) natomiast podczas prezentacji, np. na targach zwiedzający znajdują się za balustradami wyznaczającymi zakres operowania MPI. Prawdopodobieństwo zaistnienia zdarzenia zagrażającego jest niskie (podzespoły MPI opracowane zostały według norm przeciwwybuchowych, które nakładają wymogi redundancji i nieuszkadzalności istotnych elementów). Natomiast możliwość uniknięcia szkody jest duża, ponieważ pojazd ma niską prędkość, rozpędza się stopniowo, co umożliwia ewentualne ustąpienie mu miejsca/cofnięcie nogi. W przypadku operowania MPI w odizolowanym wyrobisku pojazd nie stanowi zagrożenia ze względu na nieobecność ludzi.

5. Ewaluacja ryzyka

Zastosowanie urządzeń do transportu i przestrzeganie przepisów BHP dla danego środka transportu minimalizuje ryzyko wystąpienia szkody i nie jest konieczne dalsze minimalizowanie ryzyka. W przypadku mało prawdopodobnej awarii polegającej na niekontrolowanej jeździe pojazdu zagrażającemu zdrowiu ota-

czających go osób należy zastosować funkcję zatrzymania awaryjnego.

6. Określenie funkcji bezpieczeństwa

Określenie Poziomu Zapewnienia Bezpieczeństwa PL (Performance Level) funkcji zatrzymania awaryjnego przeprowadzono w oparciu o normę PN-EN ISO 13849-1:2008.

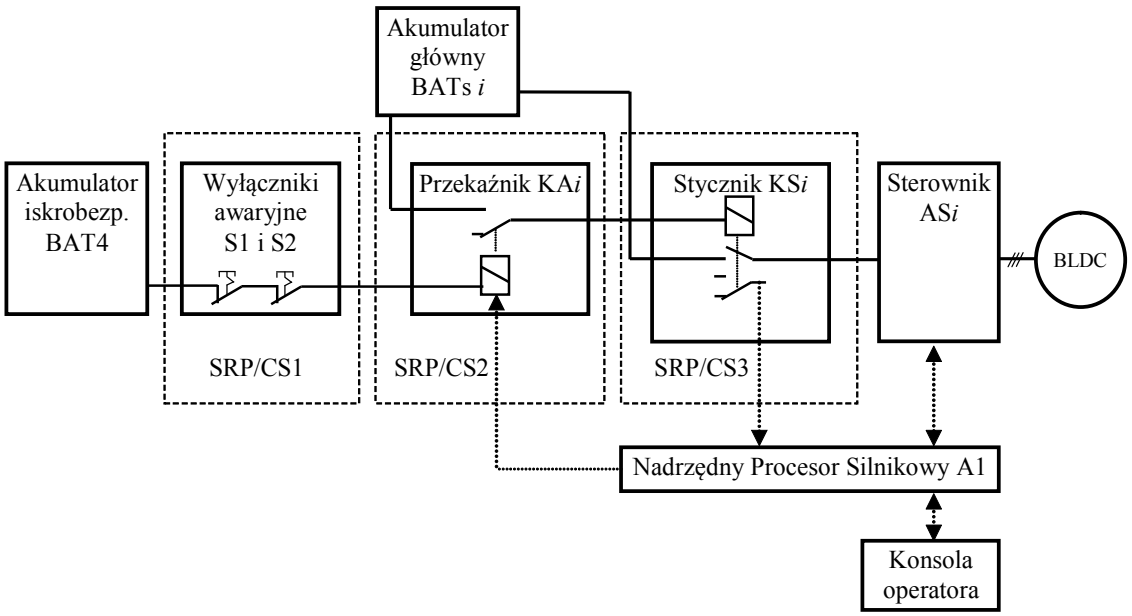
W myśl normy PN–EN ISO 12100 elementy sterownicze urządzenia do zatrzymania awaryjnego powinny być łatwo rozpoznawalne, dobrze widoczne i łatwo dostępne (rys. 1).

Zaimplementowano zatrzymanie awaryjne kategorii 0 wg norm PN-EN 60204-1 i PN-EN ISO 13850, tzn. niezwłoczne odłączenie zasilania napędów czterech kół oponowych MPI oraz napędu układarki światłowodu. Po wywołaniu sygnału zatrzymania awaryjnego efekt tego sygnału jest podtrzymywany przy pomocy przycisku z zatrzaskiem. Maszyna zatrzymuje się w miejscu, ponieważ odcięcie zasilania powoduje zablokowanie luzownika (hamulca) w każdym kole oraz odcięcie zasilania od sterowników silnikowych BLDC. Po odblokowaniu zatrzaśniętego przycisku ponowne uruchomienie jest możliwe po podaniu sygnałów sterujących z konsoli operatora.

Na rys. 2 przedstawiono schemat blokowy pojedynczego obwodu siłowego, sterowania i bezpieczeństwa realizujący funkcję zatrzymania awaryjnego.

Wyłączniki awaryjne S1 i S2 połączone są szeregowo i odcinają napięcie z iskrobezpiecznego akumulatora BAT4 od przekaźników KA1 do KA5. Styki przełączne przekaźnika KAi załączają cewki styczników KS1 do KS5. Styki główne KSi podają napięcie do sterowników silnikowych AS1 do AS5, które sterują pracą bezszczotkowych silników prądu stałego. Informacja o tym czy dany stycznik został załączony lub uległ awarii podawana jest do nadrzędnego procesora silnikowego A1 poprzez styki pomocnicze styczników KSi. Oprócz tego istnieje możliwość funkcjonalnego wyłączenia przekaźników KAi z nadrzędnego procesora silnikowego A1 w sposób programistyczny z konsoli operatora.

Tylko trzy elementy stanowią podsystem sterowania związany z bezpieczeństwem w każdym torze, tzw. SRP/CS (Safety Related Part of a Control System). Z uwagi na to, że każdy tor zbudowany jest tak samo, w dalszej części rozważania dotyczyć będą pojedynczego toru. Wyłączniki awaryjne S1 i S2 podłączone są pod względem elektrycznym szeregowo i w ten sam sposób pod względem niezawodnościowym, ponieważ ich rozmieszczenie przestrzenne na pojeździe jest na tyle odległe, że w przypadku uszkodzenia jednego z wyłączników operator nie może łatwo i szybko uruchomić drugiego wyłącznika.



Rys. 2. Identyfikacja podsystemów SRP/CS realizujących funkcję awaryjnego zatrzymania

7. Wyznaczenie wymaganego PLr

W celu wyznaczenie wymaganego Poziomu Zapewnienia Bezpieczeństwa PLr (required PL) posłużono się grafem ryzyka z rys. A.1 ISO13849-1. Przyjęto następujące dane:

- Ciężkość urazów: $\mathbf{S_2}$ – poważne, nieodwracalne,
- Częstość narażenia i czas jego trwania: $\mathbf{F_1}$ – rzadko, krótko,
- Możliwość uniknięcia zagrożenia: $\mathbf{P_1}$ – możliwe.

Na wybór parametru P_1 przemawiają następujące czynniki: identyfikacja zagrożenia „gołym" okiem, obsługa MPI przez specjalistów, niska prędkość powstawania zagrożenia, możliwość ucieczki/uniku, intuicyjne rozmieszczenie przycisków wyłączenia awaryjnego. Na podstawie grafu otrzymano **PLr=c** dla funkcji bezpieczeństwa zatrzymania awaryjnego.

8. Wyznaczanie parametrów bezpieczeństwa podsystemów SRP/CS

W celu wyznaczenia poziomu PL systemu złożonego z podsystemów SRP/CS należy najpierw określić poziomy PL każdego z podsystemów. Poziom PL dla podsystemu wyznacza się na podstawie [2]:

- struktury systemu (kategorii – B,1,2,3,4),
- wartości średniego czasu do niebezpiecznego uszkodzenia (MTTFd – krótki, średni długi),
- pokrycia diagnostycznego (DC – brak, niskie, średnie, wysokie),
- odporności na uszkodzenie spowodowane wspólną przyczyną (CCF – tylko dla kategorii 2,3,4).

8.1. Struktura systemu i MTTFd

Z uwagi na to, że podsystem SRP/CS1 (wyłączniki awaryjne) jest jednokanałowy bez diagnostyki można mu przypisać kategorię B lub 1 w zależności od osiągniętego średniego czasu do niebezpiecznego uszkodzenia MTTFd oraz od spełnienia odpowiednich wymagań z ISO 13849-1. Podsystem spełnia wymagania kategorii B oraz 1, ponieważ został zaprojektowany zgodnie z właściwymi normami oraz jest odporny na wpływy czynników zewnętrznych, a także spełnia podstawowe i sprawdzone zasady bezpieczeństwa. Zastosowane wyłączniki awaryjne uznaje się za wypróbowane elementy. Obliczenie wartości MTTFd pozwoliło zakwalifikować MTTFd jako „długi", co umożliwia przyporządkowanie podsystemowi **SRP/CS1 kategorii 1**.

Ze względu na to, że podsystem SRP/CS2 (przekaźnik) jest jednokanałowy i złożony jest z części wypróbowanych z wykorzystaniem sprawdzonych zasad bezpieczeństwa podsystem ten można zakwalifikować do **kategorii 1**, (gdyż obliczony MTTFd jest „długi").

Ze względu na to, że podsystem SRP/CS3 (stycznik) jest jednokanałowy i złożony jest z części wypróbowanych z wykorzystaniem sprawdzonych zasad bezpieczeństwa oraz posiada diagnostykę poprzez podłączenie styków pomocniczych stycznika do wejścia cyfrowego nadrzędnego procesora silnikowego A1, przy czym styki główny i pomocniczy są sprzężone mechanicznie, podsystem ten można zakwalifikować do **kategorii 2**, a obliczony MTTFd-SRP/CS3 jest długi.

8.2. Pokrycie diagnostyczne DC

Podsystem SRP/CS1 (wyłączniki awaryjne) złożony jest z dwóch połączonych szeregowo wyłączników awaryjnych S1 i S2 i nie posiada automatycznej funkcji diagnostycznej. W związku z tym przypisuje się **DC brak**.

Podsystem SRP/CS2 (przekaźnik) złożony z obwodu przekaźnika KA*i* nie posiada funkcji diagnostycznej. W związku z tym przypisuje się **DC brak**.

Podsystem SRP/CS3 (stycznik) złożony z obwodu stycznika KS*i* posiada funkcję diagnostyczną. Styk pomocniczy stycznika (NC) jest sprzężony mechanicznie ze stykami głównymi (NO). Wg ISO 13849-1 bezpośrednie monitorowanie urządzeń elektromechanicznych przez mechanicznie sprzężone styki pozwala uzyskać pokrycie diagnostyczne **DC=99%**, zatem przypisuje się **DC wysokie**.

8.3. Odporność na uszkodzenie spowodowane wspólną przyczyną CCF

Zgodnie z ISO 13849-1 nie jest wymagana analiza CCF dla kategorii 1 (dotyczy to podsystemów SRP/CS1 i 2), natomiast wymagana jest dla kategorii 2 (dotyczy SRP/CS3). W tabeli 1 przedstawiono środki i wymagania. Projekt podsystemu CRP/CS3 spełnia wymagania/ środki pozwalające uzyskać sumaryczną ilość **75 punktów**, co zapewnia odporność podsystemu na CCF (wymagania spełnione są od 65 punktów wzwyż).

8.4. Poziomy Zapewnienia Bezpieczeństwa podsystemów SRP/CS 1-3

Na podstawie tabeli 2 wyznacza się poziomy PL dla poszczególnych podsystemów.

W związku z tym **wynikowy PL systemu jest równy PLc**.

Tabela 1. Środki i wymagania dotyczące odporności na CCF (podsystem SRP/CS3)

Środek / Wymaganie		Punkty	Spełnione
Odseparowanie	Odseparowanie obwodów sygnałowych (przewodów elektrycznych), dostateczne odstępy powierzchniowe i powietrzne	15	TAK
Zróżnicowanie	Różne technologie lub fizyczne zasady, np. pierwszy kanał programowalny, a drugi kanał sprzętowy; pomiar cyfrowy i analogowy; elementy różnych producentów	20	NIE
Projekt, zastosowanie, doświadczenie	Ochrona przed przepięciem, przeciążeniem	15	TAK
	Zastosowanie wypróbowanych elementów	5	TAK
Ocena, Analiza	Przeprowadzenie analizy rodzajów i skutków uszkodzeń (FMEA), aby uniknąć uszkodzeń spowodowanych wspólną przyczyną w projektowaniu.	5	NIE
Kompetencje, Szkolenia	Szkolenie projektantów w kierunku pojmowania przyczyn i skutków uszkodzeń spowodowanych wspólną przyczyną	5	TAK
Wpływy środowiska	Badania na kompatybilność EMC	25	TAK
	Testy podsystemu pod kątem czynników środowiskowych	10	TAK

Podsystem SRP/CS1 charakteryzuje się następującymi parametrami bezpieczeństwa: Kategoria 1, MTTFd długi, DC brak, CCF nie dotyczy. Na podstawie w/w parametrów oraz tabeli 7 ISO 13849-1 poziom PL dla podsystemu wyłączników awaryjnych $\mathbf{PL_{SRP/CS1}=c}$.

Podsystem SRP/CS2 charakteryzuje się następującymi parametrami: Kategoria 1, MTTFd długi, DC brak, CCF nie dotyczy. Zatem poziom PL dla podsystemu przekaźnika $\mathbf{PL_{SRP/CS2}=c}$.

Podsystem SRP/CS3 charakteryzujący się: Kategorią 2, MTTFd długi, DC wysokie, CCF≥65 punktów, posiada $\mathbf{PL_{SRP/CS3}=d}$.

9. Osiągnięty PL systemu

Na podstawie poziomów PL każdego podsystemu wyznacza się wynikowy PL całego systemu bezpieczeństwa. Służy do tego tabela 11 z ISO 13849-1. Najniższy PL podsystemu to PLc (SRPC/CS1, SRPC/CS2), natomiast SRP/CS3 charakteryzuje się poziomem PLd.

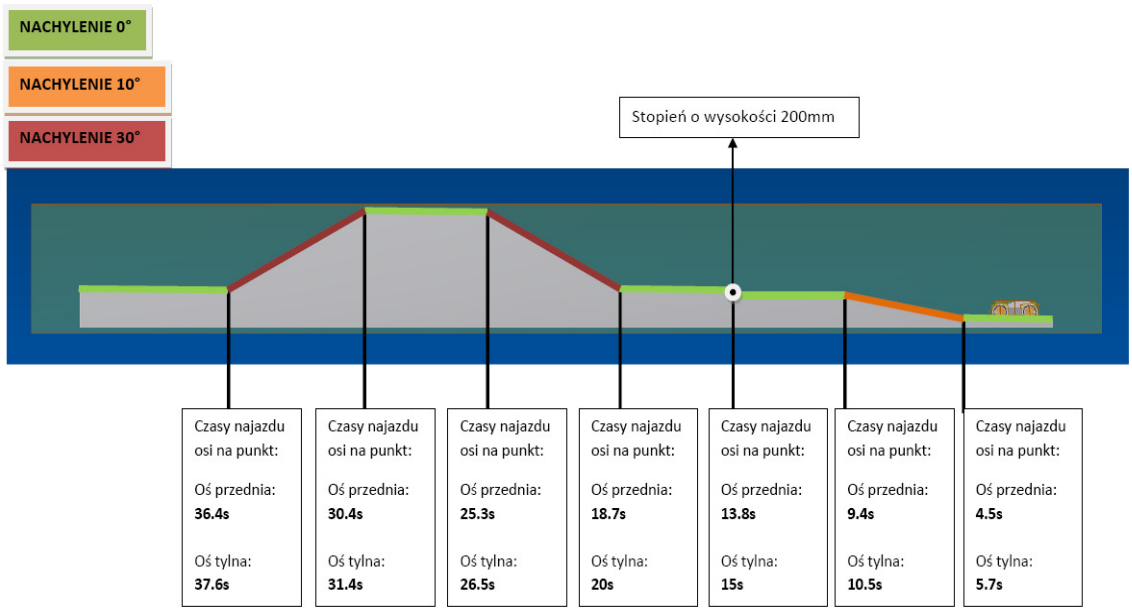
10. Porównanie osiągniętego PL z PLr wymaganym

Porównując wymagany Poziom Zapewnienia Bezpieczeństwa PLr na podstawie grafu ryzyka oraz osiągnięty Poziom Zapewnienia Bezpieczeństwa PL systemu (funkcji zatrzymania awaryjnego) stwierdza się, że spełniono wymaganie w postaci PL ≥ PLr, gdyż PL=c oraz PLr=c.

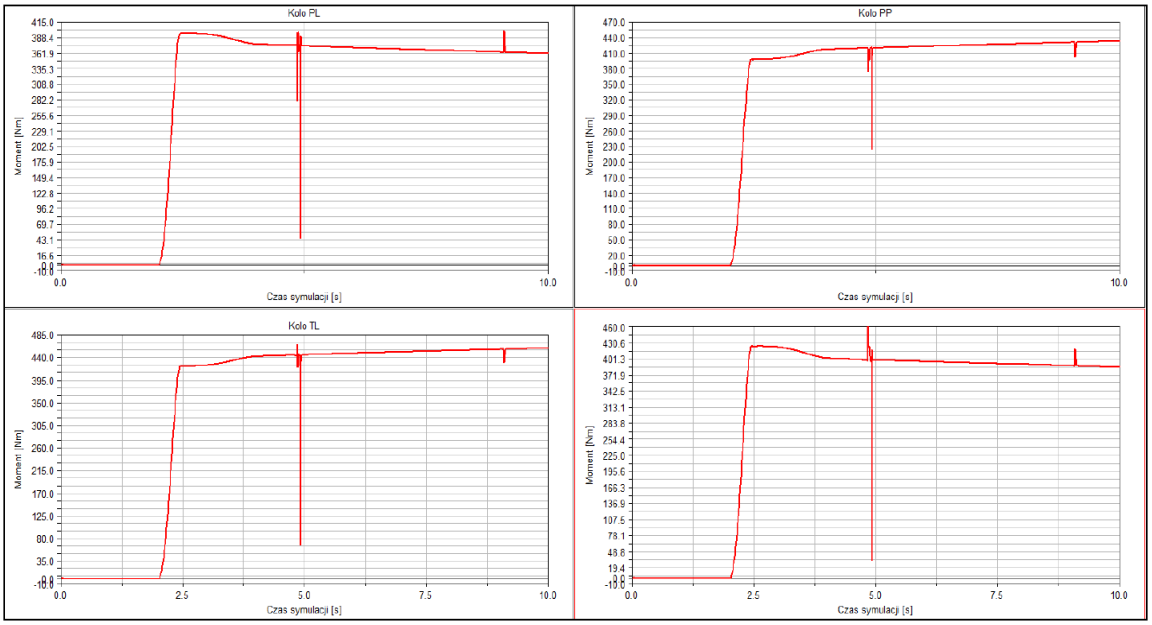
11. Wyznaczanie parametrów napędów metodami symulacyjnymi

W celu dokonania właściwego wyboru odpowiednich silników głównych oraz pozostałych komponentów bloku napędowego wykonano badania symulacyjne:

- obrotu uproszczonego modelu MPI wokół własnej (pionowej) osi przy założeniu stałej prędkości obrotowej kół,
- przejazdu modelu MPI po torze przeszkód (przy założonej stałej prędkości obrotowej



Rys. 3. Schemat zamodelowanego toru przeszkód z zaznaczonymi charakterystycznymi punktami oraz z czasem najazdu osi modelu na te punkty



Rys. 4. Charakterystyki momentów występujących na kołach platformy podczas obrotu wokół własnej osi (PP – przednie prawe, TP – tylne prawe, PL – przednie lewe, TL – tylne lewe)

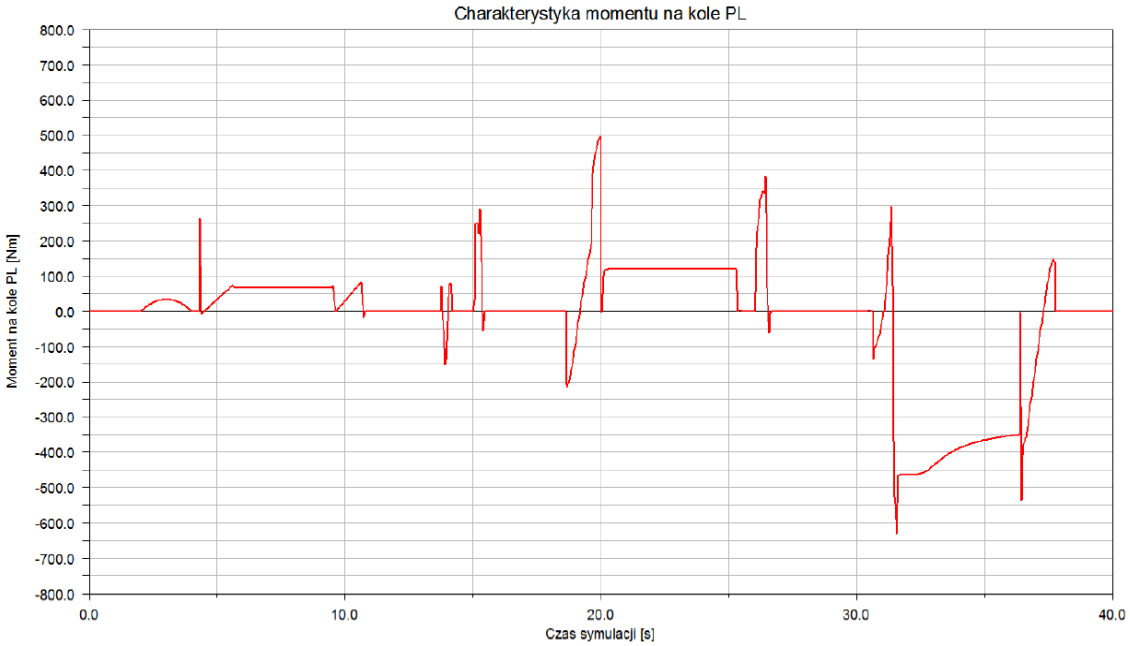
kół) skonstruowanym wg wytycznych do projektu MPI (rys. 3):

- pochyłości co najmniej 30°,
- progi o wysokości co najmniej 20 cm,
- miejsca zawodnione o głębokości co najmniej 40 cm.

W badaniach symulacyjnych założono model MPI w wersji jednomodułowej, tj. jedna skrzynia ognioszczelna o wymiarach dł. 180 x szer. 184 x wys. 69,5 cm. Dodatkowo przyjęto następujące założenia:

– platformę zamodelowano jako obiekt sztywny,
– całkowita masa modelu MPI 626 kg,
– prędkość środka masy korpusu MPI podczas przejazdu przez tor przeszkód 1 m/s,

prędkość obrotu kół w symulacji obrotu MPI wokół własnej osi jest równa prędkości obrotowej wymaganej do osiągnięcia przez środek ciężkości MPI prędkości postępowej równej



Rys. 5. Charakterystyka momentu na kole maksymalnie obciążonym podczas przejazdu przez tor przeszkód

1m/s. W wyniku badań symulacyjnych otrzymano:
- maksymalny moment napędowy występujący podczas obrotu MPI wokół własnej osi 458,5 Nm (rys. 4),
- maksymalny moment napędowy występujący podczas przejazdu MPI przez tor przeszkód 650 Nm w czasie ok. 0,7 sek. (rys. 5 – wykresy dla pozostałych kół pominięto).

Ponadto wykonano analitycznie dalsze obliczenia wymagane do przeprowadzania projektu wstępnego bloku napędowego.

Założenia:

Prędkość przejazdu: V=0,6 [m/s] = 36 [m/min],
średnica kół jezdnych: D = 0,6 [m],
Ilość obrotów koła jezdnego potrzebnych do uzyskania zakładanej prędkości:

$V = \omega \cdot D/2 = \pi n/30 \cdot D/2,$

$n = 60V/\pi D = 60 \cdot 0,6/\pi \cdot 0,6 = 19,1$ [obr./min].

Przyjęta ilość obrotów koła jezdnego n=20 [obr./min]

Na podstawie powyższych obliczeń, studium norm oraz doświadczenia w konstruowaniu bloków napędowych do robotów mobilnych zaproponowano przekładnię z przełożeniem i=60,8:

$n_s = n \cdot i$

$n_s = 20 \cdot 60,8 = 1216$ [obr./min].

Zapotrzebowanie momentu na kole jezdnym wzięto z wyliczeń programu symulacyjnego i przyjęto M_{max} = 458,5 Nm. Analityczne obliczenia dokonano również w pracy [3].

12. Podsumowanie

System bezpieczeństwa realizujący funkcję zatrzymania awaryjnego zaimplementowano zgodnie z normą PN-EN ISO 13849-1:2008. Otrzymany poziom PL jest równy wymaganemu poziomowi PLr. Oprócz wymagań dyrektywy maszynowej i dyrektywy ATEX, maszyna musi spełniać wymagania dyrektywy EMC (2004/108/WE). Procedurę badań EMC dla górniczego robota inspekcyjnego przedstawiono w pracy [4].

Elementy bloków napędowych wykonane w odpowiednich technikach budowy przeciwwybuchowej i umożliwiające osiągnięcie wyznaczonych symulacyjnie parametrów zostały zakupione i wdrożone na platformie MPI robota.

13. Literatura

[1]. A. Domaracki, K. Krykowski: "Silniki BLDC – klasyczne metody sterowania", *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 72/2005, str. 155-159.

[2]. L. Kasprzyczak: „Wyznaczanie poziomów bezpieczeństwa SIL i PL – ocena funkcji bezpieczeństwa implementowanych w układach sterowania maszyn", Automatyka 1-2/2015, str. 25-35.

[3]. L. Kasprzyczak, A. Dzikowski, D. Nowak: „Wyznaczanie parametrów elektromechanicznych głównych napędów mobilnej platformy inspekcyj-

nej", *Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa*, 7(509)/2013, str. 30-36.
[4]. L. Kasprzyczak, R. Pietrzak: "Electromagnetic compatibility tests of mining mobile inspection robot", *Archives of Mining Sciences*, Vol. 59 (2014), No 2, str. 427–439.

Projekt finansowany ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w ramach Programu Badań Stosowanych, realizowany przez konsorcjum naukowe: Instytut Technik Innowacyjnych EMAG i Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP. Nr umowy: PBS1/A2/12/2012; Czas realizacji: 1 XI 2012 – 31 VIII 2015.