

Marek POŁĄCARZ¹, Robert DROBINA²

Opiekun naukowy: Robert DROBINA²

WYMAGANY POZIOM BEZPIECZEŃSTWA MASZYN

Streszczenie: Mylić się jest rzeczą ludzką. Każdy człowiek ma prawo do błędu, dlatego maszyny powinny być konstruowane w sposób bezpieczny. Na przestrzeni lat stworzono wiele norm i aktów prawnych określających konkretne zasady tworzenia bezpiecznej maszyny. Ujednolicenie systemów bezpieczeństwa pozwoli na uzyskanie kontroli nad wszystkimi potencjalnymi zagrożeniami.

Słowa kluczowe: bezpieczeństwo, zabezpieczenie, sterowanie, ocena ryzyka

REQUIRED SAFETY LEVEL OF MACHINES

Summary: To err is human. Everyone has the right to make mistakes, so machines should be constructed safely. Over the years, many standards and legal acts have been created that define specific rules for creating a safe machine. Standardization of safety systems will allow to gain control over all potential threats.

Keywords: safety, protection, safeguard, control, risk score

1. Wprowadzenie

Każda maszyna bez względu na pochodzenie powinna być odpowiednio zabezpieczona. Unikanie wypadków, to nie tylko podejście społeczne, ale istotne również prawnie. Bezpieczeństwo pracy dzięki Międzynarodowej Organizacji Pracy, jest nie tylko sprawą krajową. Dodatkowo należy wziąć pod uwagę fakt, że Polska jest członkiem Unii Europejskiej od dnia 1 maja 2004 roku, co wymusza stosowanie się do odpowiednich dyrektyw. Z perspektywy bezpieczeństwa maszyn są to przede wszystkim Dyrektywa Maszynowa oraz Dyrektywa Narzędziowa. Ta pierwsza dotyczy przede wszystkim producentów maszyn, których zadaniem jest dostosowanie urządzenia do wymagań zasadniczych (jako wyrób). Istotne są one przede wszystkim w momencie oddania maszyny do użytku. Druga natomiast jest bezpośrednio powiązana z użytkownikami, ponieważ przedstawia minimalne wymagania

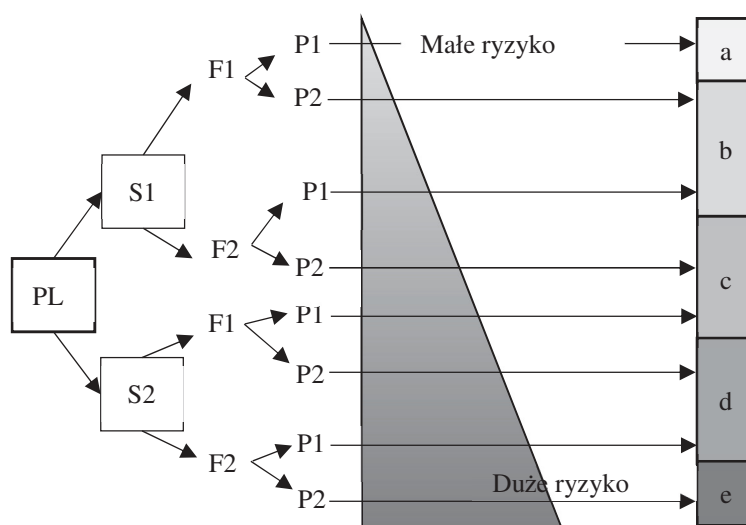
¹ mgr inż. Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, specjalność: Inżynieria Zarządzania Przedsiębiorstwem, email: marek.polaczar@gmail.com

² dr hab. inż. prof. ATH, Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, email: rdrobina@ath.bielsko.pl

dostosowania maszyn odnosząc się bezpośrednio do środowiska pracy. Wszystkie te zapisy prawne są ważne dla pracowników, ponieważ każdy człowiek ma prawo do popełniania błędów, a życie ma się tylko jedno. Z tego powodu należy go chronić.

2. Wymagany poziom zapewnienia bezpieczeństwa w aspekcie bezpiecznej maszyny

Jednym ze sposobów wyznaczania ryzyka na maszynie jest określenie go na podstawie grafu. W odniesieniu do określonego poziomu bezpieczeństwa należy dopasować systemy ochrony pracownika.



Rysunek 1. Graf wyznaczania wymaganego poziomu zapewnienia bezpieczeństwa.
Opracowanie własne na podstawie normy PN-EN ISO 13849-1

Graf pokazany na rysunku nr 1 określa ścieżkę postępowania dla poziomu wydajności bezpieczeństwa (ang. *Performance Level*). Najmniejsze ryzyko ma maszyna z poziomem PL_a, a najwyższe i jednocześnie najbardziej niebezpieczna określona jako PL_e.

Wprowadzone na grafie oznaczenia to: wspomniany poziom zapewnienia bezpieczeństwa oznaczony jako PL, literą S określa się jak bardzo uraz jest poważny (ang. *Severity of Injury*), F to częstotliwość, a także ekspozycja na zagrożenie (ang. *Frequency / exposure to hazard*), P to możliwość uniknięcia zagrożenia lub ograniczenie szkód (ang. *possibility of avoiding hazard or limiting harm*). Małe litery a, b, c, d, e określają poziom bezpieczeństwa na podstawie przedstawionego grafu.

Wyznaczenie ścieżki postępowania skupia się na trzech omówionych punktach. S1 to lekkie uszkodzenia, natomiast S2 to uszkodzenia poważne (nieodwracalne w tym śmierć). F1 to krótka ekspozycja lub rzadka częstotliwość, a F2 to zagrożenie ciągłe lub długa ekspozycja. Na samym końcu określa się możliwość uniknięcia niebezpieczeństwa. P1, jeżeli jest możliwe pod pewnymi warunkami, a P2, gdy jest to prawie niemożliwe.

Tabela 1. Wymagany poziom bezpieczeństwa w sensie technicznym. Źródło: Przewodnik bezpieczeństwa maszyny OMRON [10]

DIN EN ISO 13849-1		EN 62061
S	Ciężkość urazów	Nieodwracalne uszkodzenie ciała (4 punkty) (śmierć, utrata oka lub ręki)
S1	Lekkie urazy (zwykle odwracalne)	Nieodwracalne uszkodzenie ciała (3 punkty) złamana kośćczyzna(-y), utrata palca(-ów))
S2	Ciężkie urazy (zwykle nieodwracalne, z uwzględnieniem urazów śmiertelnych)	Odwracalne uszkodzenie ciała (2 punkty) (wymagana interwencja personelu medycznego) Odwracalne uszkodzenie ciała (1 punkt)
F	Częstość narażenia na zagrożenie i/lub czas jego trwania	Częstość ekspozycji (czas ekspozycji > 10 min) < 1 h (5 punktów)
F1	Rzadkie do dość częstych i/lub krótki czas narażenia	> 1 h do < 1 dzień (5 punktów*) > 1 dzień do < 2 tygodnie (4 punkty*)
F2	Częste do ciągłych i/lub długi czas	> 2 tygodnie do < 1 rok (3 punkty*) > 1 rok (2 punkty*) * Jeżeli czas ekspozycji jest krótszy niż 10 min to wartość można obniżyć o jeden poziom
P	Możliwość uniknięcia zagrożenia	Niemożliwe (5 punktów)
P1	Możliwe w określonych warunkach	Rzadkie (3 punkty)
P2	Możliwe z trudnością	Prawdopodobne (1 punkt)

Zgodnie z wytycznymi w normach w sensie technicznym, PL_r (wymagany poziom zapewnienia bezpieczeństwa) jest to najmniejsza „wartość zadana”, jaka musi być osiągnięta przez realny układ techniczny. W celu pełniejszego określenia ryzyka w Tabeli 1 przedstawiono również informacje z normy PN-EN 62061. Do oceny ryzyka należy wykorzystywać tę samą zasadę, gdzie ryzyko jest kombinacją prawdopodobieństwa pojawienia się szkody i ciężkości tej szkody.

Możliwość wystąpienia niebezpiecznej sytuacji w ciągu godziny dla bezpiecznej maszyny

Norma PN-EN ISO 13849-1 wspomina także o wskaźniku PFH_d (ang. *Probability of Dangerous Failure per Hour*), który wskazuje na szansę wystąpienia niebezpiecznej sytuacji w ciągu godziny. Tabela numer 2 pokazuje akceptowalny czas do wystąpienia niebezpiecznego zdarzenia.

Tabela 2. Możliwość wystąpienia niebezpiecznego zdarzenia. Opracowanie własne na podstawie PN-EN ISO 13849-1 oraz PN-EN IEC 62061

Poziom wydajności bezpieczeństwa	Prawdopodobieństwo wystąpienia niebezpiecznego zdarzenia w ciągu godziny	Maksymalny, akceptowalny czas do wystąpienia niebezpiecznego zdarzenia
PL_a	0,001% - 0,01%	10 000 godzin \approx 1,14 roku
PL_b	0,0003% - 0,001%	100 000 godzin \approx 11 lat
PL_c	0,0001% - 0,0003%	333 333 godzin \approx 38 lat
PL_d	0,00001% - 0,0001%	1 000 000 godzin \approx 114 lat
PL_e	0,000001% - 0,00001%	10 000 000 godzin \approx 1141 lat

3. Bezpieczeństwo przenośników taśmowych w przestrzeni produkcyjnej

Przenośnik taśmowy może być niebezpieczny w przypadku kontaktu z człowiekiem. Dodatkowe zagrożenie wynika z umieszczenia tego urządzenia, jako elementu

łącącego zespoły maszyn takie jak wszelkiego rodzaju np. prasy lub młyny. Pochwycenie, a nawet wciągnięcie może być niebezpieczne samo w sobie, nie wspominając już o przeniesieniu człowieka do innego, potencjalnie bardziej niebezpiecznego miejsca. Naprzeciw potrzebom klientów oraz ich bezpieczeństwa, wychodzą producenci firm takich jak m.in. SICK, Schneider Electric czy Omron tworząc wyłączniki linkowe. Ich zasada działania polega na naprężeniu linki wzdłuż całej długości przenośnika. Utrata naprężenia wyzwala styk zatrzymujący w sposób bezpieczny silnik elektryczny, który za pomocą przekładni napędza przenośnik. W porównaniu do standardowego przycisku bezpieczeństwa, który zgodnie z normą PN-EN ISO 13850 powinien być czerwonym przyciskiem grzybkowym znajdującym się na żółtym tle, zabezpieczenie to znajduje się na całej trasie zespołu przenośników, a nie tylko w jednym, konkretnym miejscu.

Napęd należy również zabezpieczyć przed zagrożeniami elektrycznymi, takimi jak przebiecie izolacji elektrycznej poprzez odpowiednio dobrane przekroje przewodów, co nie pozwoli na przegrzanie ich, a osłonięcie ich rurami karbowanymi na fragmentach, do których może mieć dostęp osoba nieupoważniona ograniczy możliwość uszkodzenia mechanicznego przewodu. Ponadto w szafie elektrycznej należy zabezpieczyć obwód wyłącznikiem silnikowym, co pozwoli na przerwanie obwodu zasilania w przypadku przekroczeniu nastawionego prądu.

Wstęp do strefy pracy powinien być odgradzony mechanicznie, a ewentualne drzwi serwisowe powinny zostać zabezpieczone przed otwarciem za pomocą wyłącznika krańcowego.

4. Bezpieczne sterowanie stycznikowe – analiza przypadku

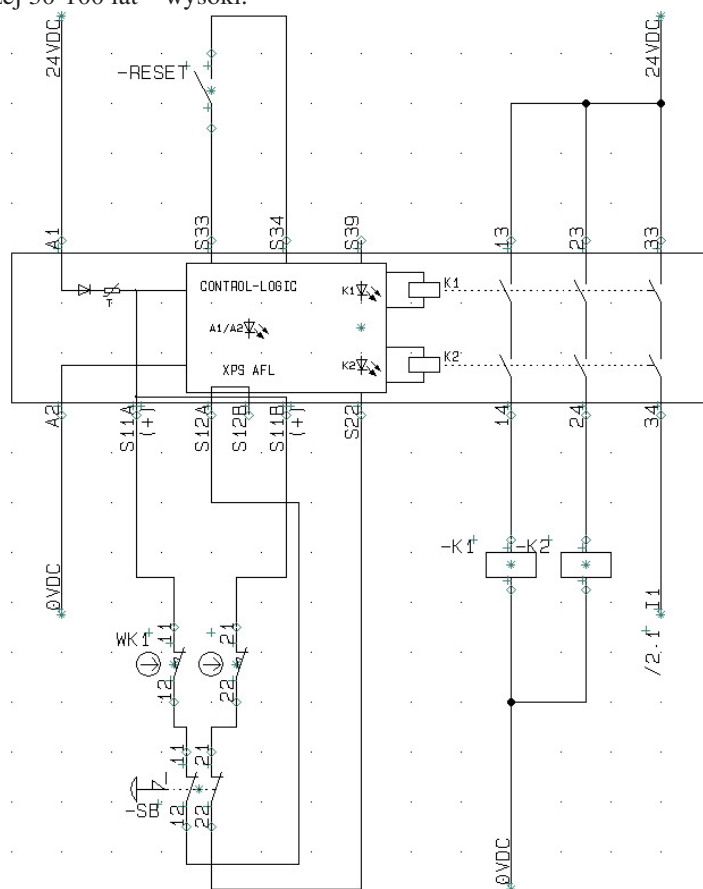
Zasada działania opiera się na zasileniu silnika trzema fazami (napięcie międzyfazowe pomiędzy U-V, V-W, U-W powinno wynosić 400 volt prądu przemiennego), co wprawi silnik elektryczny w ruch. Jednocześnie wał silnika również powinien się kręcić. To dzięki niemu moment obrotowy zostanie przełożony na przekładnię, a następnie na taśmę, co wpłynie ostatecznie na ruch przenośnika taśmowego.

Bezpieczne sterowanie stycznikowe powinno zawierać w sobie układy logiczne, a konkretnie układy bezpieczeństwa. Całość jest zależna od wymaganej kategorii bezpieczeństwa, której zasady określenia pokazano w tabeli 3.

Tabela 3. Dopasowanie wymaganego poziomu bezpieczeństwa do kategorii bezpieczeństwa. Opracowanie własne na podstawie [15]

PL _a							
PL _b							
PL _c							
PL _d							
PL _e							
	Kat. B	Kat. 1	Kat. 2	Kat. 2	Kat. 3	Kat. 3	Kat. 4
	DC _{AVG} brak	DC _{AVG} brak	DC _{AVG} niskie	DC _{AVG} średnie	DC _{AVG} niskie	DC _{AVG} średnie	DC _{AVG} wysokie

Osiągnięcie wymaganego poziomu bezpieczeństwa jest zależne od użytej kategorii (B, 1, 2, 3, 4), pokrycia diagnostycznego (ang. *Diagnostic Coverage*, czyli parametru, który pozwala określić liczbę niebezpiecznych uszkodzeń możliwych do wykrycia przez funkcje diagnostyczne), a także parametru $MTTF_d$ – przedstawionego w tabeli 3 za pomocą prostokątów, wypełnienie kropkowane to niski $MTTF_d$, wypełnienie kratkowane to średni, a wypełnienie paskami – wysoki (ang. *Mean Time to Dangerous Failure*, czyli średni czas do niebezpiecznej awarii). Norma PN-EN ISO 13849-1 określa, czas dla parametru $MTTF_d$ i jest to 3-10 lat – niski, 10-30 lat – średni, a powyżej 30-100 lat – wysoki.



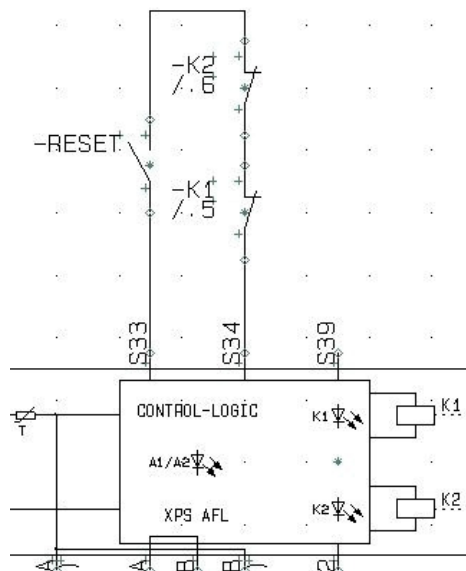
Rysunek 2. Podłączenie przekaźnika bezpieczeństwa Schneider Electric, XPS AFL.
Opracowanie własne

Na przykładzie przekaźnika bezpieczeństwa Schneider Electric XPS AFL5130 zaprezentowano układ sterowania wykorzystujący wyłącznik krańcowy (WK1), wyłącznik awaryjny (SB), a także dwie cewki styczników (K1 oraz K2), na których w przypadku utraty bezpieczeństwa na maszynie spowoduje rozłączenie obwodu prądowego. Układ pokazany na rysunku nr 2 ma przygotowany również sygnał „I1” 24VDC potwierdzający bezpieczeństwo do układu zewnętrznego (np. sterownik PLC). W przypadku sterowania silnikiem przez przemiennik częstotliwości (przykład

dla przemienników Schneider Electric serii ATV320), możliwe jest do wykorzystania wejście STO (ang. *Safe Torque off* – bezpieczne wyłączenie momentu obrotowego), które należy zasilić z „P24”, połączyć przez styk NO przekaźnika bezpieczeństwa, a potwierdzenie bezpiecznego układu wróci na wspomniany zacisk STO.

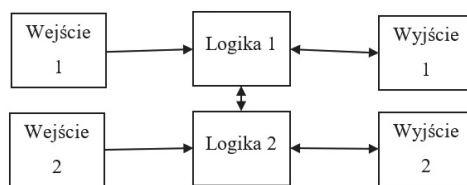
5. Wyznaczanie wymaganego poziomu bezpieczeństwa w analizowanym systemie

Aby zweryfikować wymagany poziom bezpieczeństwa, należy na początku zdefiniować system. W omawianym przypadku będzie to załączenie napędu, który sterowany jest stycznikami K1 i K2. Usprawnienie całego układu można wykonać poprzez wykorzystanie styków NC styczników, które w szeregu z przyciskiem reset zapewnią dodatkową kontrolę wyjść. Takie rozwiązanie nazywane jest jako EDM (ang. *External Device Monitoring*) i zostało przedstawione na rysunku nr 3.



Rysunek 3. Monitorowanie urządzeń zewnętrznych (EDM) na schemacie elektrycznym, w nawiązaniu do rozbudowanej opcji z rysunku nr 2.
Opracowanie własne

Kontrola wyjść za pomocą ich styków pomocniczych to popularne rozwiązanie ze względu na jego niesamowitą funkcjonalność, a także stosunkowo niski koszt, który ogranicza się do wykorzystania dodatkowych styków stycznika (w większości dostępnych na maszynie bez konieczności dodatkowych modułów). Moduł styków pomocniczych 2NC + 2NO (wymagane wykorzystanie 1 styku normalnie zamkniętego) dla omawianych styczników, który pozwoli na ewentualną dalszą rozbudowę systemu, to koszt 64.84 zł [16], co w perspektywie bezpieczeństwa pracy jest rozwiązaniem niskobudżetowym. Całość można przedstawić w sposób graficzny (rysunek nr 4).



Rysunek 4. System pokazany w sposób blokowy. Opracowanie własne

Schemat blokowy pokazuje możliwość spełnienia kategorii 3 lub 4. Wejściami są wyłącznik ciągnowy (trwałość mechaniczna 60 000 cykli) [3] oraz wyłącznik awaryjny (trwałość mechaniczna 10 000 000 cykli) [17]. Logika realizowana jest przez przekaźnik bezpieczeństwa ($MTTF_d = 172.1$ lat, $DC > 99\%$) [14]. Wyjściami są styczniki LC1D09BD ($MTTF_d = 2912$ lat) [19].

$MTTF_d$ tego systemu można założyć jako wysoki zgodnie z PN-EN ISO 13849-1. Pokrycie diagnostyczne DC można założyć jako wysokie zgodnie z PN-EN ISO 13849-1, ponieważ zastosowanie styków NC w szeregu przycisku RESET pozwoli na precyzyjne monitorowanie układu wykonawczego. Oznacza to, że zgodnie z tabelą nr 3 uzyskano kategorię 4, cały system spełnia wymogi systemu PL_e.

6. Wnioski

Wyznaczenie wymaganego poziomu bezpieczeństwa to proces czasochłonny, który zależy od wielu czynników. Nawet jeżeli określone elementy spełniają pewne normy, znaczącą rolę odgrywa w nich również ich podłączenie. Wykorzystanie styczników bez sygnału EDM, może obniżyć kategorię bezpieczeństwa nawet o dwa szczeble, co jednocześnie obniży poziom niezawodności PL.

Wymagany poziom bezpieczeństwa jest zależny nie tylko od samej konstrukcji, ale także stosowanej technologii, prędkości pracy, a nawet otoczenia. Ponadto dostosowanie kategorii bezpieczeństwa do poziomu niezawodności jest zależne także od pokrycia diagnostycznego zastosowanych elementów i średniego czasu do niebezpiecznej awarii, które powinno zostać podane przez producenta zgodnie z określonymi normami. W efekcie może okazać się, że w niektórych przypadkach do poprawy bezpieczeństwa wymagana będzie wymiana elementów na lepsze jakościowo. Rzetelne przeprowadzenie oceny ryzyka stanowiskowego pozwoli na weryfikację wymaganej kategorii bezpieczeństwa. Jest to istotne, ponieważ bezpieczeństwo osób eksploatujących maszynę powinno być stawiane na pierwszym miejscu.

LITERATURA

1. Dyrektywa ramowa 89/391/EWG w sprawie wprowadzenia środków w celu poprawy bezpieczeństwa i zdrowia pracowników w miejscu pracy.
2. Instrukcja obsługi przekaźnika bezpieczeństwa XPS AFL 5130: <https://pneumatykanet.pl/pub/schneider/dane/XPSAFL5130.pdf>, 17.10.2022.
3. Instrukcja obsługi wyłącznika ciągnowego serii XY2C: <https://www.se.com/pl/pl/product/XY2CE1A290/preventa-xy2c->

- wy% C5%82% C4%85cznik-ci% C4%99gowy-2nc+2no-zaciski-
% C5%9Brubowe/, 17.10.2022.
4. Karta katalogowa przemiennika częstotliwości ATV320 (Schneider Electric): <https://www.se.com/pl/pl/product/ATV320U22M3C/przemiennik-cz% C4%99stotliwo% C5%9Bci-atv320-3-fazowe-200-240vac-50-60hz-2-2kw-11a-ip20/>, 17.10.2022.
 5. Norma PN EN ISO 13849-1 Bezpieczeństwo maszyn - Elementy systemów sterowania związane z bezpieczeństwem.
 6. Norma PN-EN IEC 62061 Bezpieczeństwo maszyn - Bezpieczeństwo funkcjonalne systemów sterowania związanych z bezpieczeństwem.
 7. Norma PN-EN ISO 13850 Bezpieczeństwo maszyn - Funkcja zatrzymania awaryjnego -- Zasady projektowania.
 8. Obwieszczenie Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 18 czerwca 2020 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy – Kodeks pracy.
 9. Przewodnik Bezpieczne Maszyny. Bezpieczna maszyna w sześciu krokach: https://cdn.sick.com/media/docs/8/98/398/special_information_guide_for_safe_machinery_pl_im0062398.pdf, 23.09.2022.
 10. Przewodnik bezpieczeństwa maszyn przedsiębiorstwa OMRON: <http://sklep.jbc.com.pl/images/OMRON%20Przewodnik%20bezpieczenstwa%20maszyn%202011%20PL.pdf>, 17.10.2022.
 11. Przewodnik po technice bezpieczeństwa autorstwa przedsiębiorstwa FESTO: https://www.festo.com/rep/pl_pl/assets/pdf/Przewodnik_po_tech_nice_bezpieczenstwa_2014_LR.pdf, 16.10.2022.
 12. Serwis internetowy Centralnego Instytutu Ochrony Pracy – Państwowy Instytut badawczy: <https://www.ciop.pl>, 18.02.2022.
 13. Serwis internetowy Katedry Automatyki, Biomechaniki i Mechatroniki Politechniki Łódzkiej, Instrukcja ćw. 3, Układy regulacji silników AC: <https://abm.p.lodz.pl/images/materialy/Automatyzacja/Cw3-instrukcja-.pdf>, 17.03.2022
 14. Serwis internetowy przedsiębiorstwa Keyence: <https://www.keyence.eu/ss/products/safetyknowledge/performance/level/>, 16.10.2022.
 15. Serwis internetowy „Bezpieczeństwo w systemach sterowania”: <https://bezpieczenstwosystemachsterowania.pl/2019/10/kategoria-4/>, 17.10.2022.
 16. Sklep Internetowy TME: https://www.tme.eu/pl/details/ladn22/styczniki-wyposazenie-dodatkowe/schneider-electric/?brutto=1¤cy=PLN&gclid=Cj0KCQjwhsmaBhCvARIsAlbEbH6_BUEykiI2OHh2PN4DeYiGRy5uQr7BZLi5h72N71Gr2ZdxwW_MjhIaAi3XEALw_wcB, 21.10.2022.
 17. Specyfikacja pojedynczego bloku styków 1NC Harmony XB4: <https://www.se.com/pl/pl/product-range/632-harmony-xb4/#documents>, 20.10.2022
 18. Ustawa z dnia 21 października 2008 r. Rozporządzenie Ministra Gospodarki w sprawie zasadniczych wymagań dla maszyn (Dz. U. 2008 nr 199 poz. 1228).
 19. Wartości MTTF styczników serii LC1D Schneider Electric: <https://www.se.com/pl/pl/faqs/FA297883/>, 18.10.2022.