Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego | Rzeczpospolita Polska | Dofinansowane przez Unię Europejską

Politechnika Świętokrzyska
Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn

Kierunek studiów:
Transport

Szczepan Kostecki

Materiały dydaktyczne do przedmiotu

BEZPIECZEŃSTWO MASZYN

opracowane w ramach realizacji Projektu
„Dostosowanie kształcenia w Politechnice Świętokrzyskiej do potrzeb współczesnej gospodarki”
FERS.01.05-IP.08-0234/23

Kielce, 2025

Spis treści

1. Bezpieczeństwo maszyn w transporcie – rola stosowania dyrektyw UE

Bezpieczeństwo maszyn jest zagadnieniem na pograniczu prawa a inżynierii jednak jest jednym z kluczowych elementów zapewnienia niezawodnego, efektywnego i bezpiecznego funkcjonowania maszyn i urządzeń jak i systemów transportowych. W dobie ciągłego rozwoju mechanizacji, automatyzacji i integracji tych rozwiązań w transporcie, konieczne jest nie tylko projektowanie ale również eksploatowanie maszyn zgodnie z wymaganiami prawnymi i technicznymi. Najważniejszym dokumentem Unii Europejskiej regulującym wymagania stawiane maszynom i urządzeniom jest dyrektywa maszynowa 2006/42/WE. Stanowi ona podstawę prawną związaną z projektowaniem, produkcją oraz wprowadzeniem na rynek tych maszyn (Dyrektywa 2006/42/WE, Dz.U. UE L 157/24, 2006; Guide to application of the Machinery Directive, 2019).

Choć dyrektywa maszynowa kojarzona jest głównie z przemysłem produkcyjnym, jest równie istotna w sektorze transportu i logistyki. Dyrektywy Unii Europejskiej (w tym dyrektywa maszynowa) ratyfikowane przez państwa członkowskie stają się podstawą do utworzenia krajowego prawa, które harmonizuje przepisy zapewniając jednolite standardy prawne we wszystkich krajach Wspólnoty Europejskiej.

Celem jednolitych wymagań technicznych i norm bezpieczeństwa jest:
- zwiększenie bezpieczeństwa użytkowników i operatorów maszyn,
- ograniczenie liczby wypadków i niebezpiecznych awarii wynikających z nieprawidłowego działania urządzeń,
- zapewnienie swobodnego przepływu maszyn i urządzeń w obrębie rynku wewnątrz wspólnotowego,
- podnoszenie jakości technicznej od projektowania przez produkcję po eksploatacje maszyn (EUR-Lex: Machinery Directive 2006/42/WE).

W kontekście transportu i logistyki, dyrektywy unijne mają bezpośredni wpływ na bezpieczeństwo każdej maszyny wykorzystywanej w transporcie a w szczególności przenośniki, systemy załadunkowe, wózki widłowe, linie sortujące, dźwigi.

Stosowanie dyrektyw niesie ze sobą takie korzyści jak:
- poprawa bezpieczeństwa pracy – maszyny zaprojektowane i eksploatowane zgodnie z dyrektywą minimalizują ryzyko wypadków i sytuacji zagrożenia dla zdrowia bądź życia,

- zgodność z prawem – dyrektywy UE stanowią prawo którego przestrzeganie jest wymogiem,
- ułatwienia z wprowadzeniem maszyn do obrotu – zgodność z dyrektywami ułatwia producentom dostęp do rynku i przyśpiesza procedury dopuszczające,
- budowanie reputacji i przewagi konkurencyjnej – dbanie o bezpieczeństwo techniczne maszyn jest mile widziane zarówno przez pracowników jak i klientów,
- optymalizacja kosztów – bezpieczne maszyny mimo zwiększonemu kosztowi zakupu dzięki większej jakości rzadziej ulegają awarii co zmniejsza koszty serwisowania i przestojów.

Choć celem tzw „nowego podejścia" Unii Europejskiej jest ułatwienie swobodnego przepływu towarów na terenie wspólnoty, to liczne dyrektywy i rozporządzenia warunkują dopuszczenie wyrobów technicznych do rynku. Dyrektywy stawiają minimalne wymagania w zakresie bezpieczeństwa, zdrowia i kompatybilności.

Najważniejsze z dyrektyw które tyczą się środków technicznych wykorzystywanych w transporcie to:

- maszyny i urządzenia techniczne (tzw. dyrektywa maszynowa MD 2006/42/WE) – główna dyrektywa tworząca trzon wymagań dla projektowania, budowy i oceny zgodności maszyn. Istotna dla między innymi przenośników, systemów załadunkowych, wózków, dźwigów,
- urządzenia niskonapięciowe (LVD 2014/35/UE) – dyrektywa związana z bezpieczeństwem sprzętu elektrycznego pracującego w zakresie od 50V do 1000V napięcia prądu przemiennego (AC) oraz w zakresie od 75V do 1500V napięcia prądu stałego (DC). Szerokie zastosowanie w urządzeniach wykorzystywanych w transporcie gdzie urządzenia pracują z zasilaniem sieciowym,
- kompatybilność elektromagnetyczna (EMC 2014/30/UE) – dyrektywa reguluje kompatybilność elektromagnetyczną urządzeń tzn. zapewnia brak wzajemnego zakłócania się urządzeń i ich odporność na zakłócenia. Zastosowania w wszelkiego rodzaju urządzeniach elektrycznych generujących podczas pracy pole elektromagnetyczne np. sprzęt sieciowy, systemy RFID ale również skanery laserowe czy falowniki wykorzystywane w napędach maszyn,
- urządzenia radiowe (RED 2014/53/UE) – dyrektywa będąca rozwinięciem dyrektywy EMC 2014/30/UE. Skupia się na urządzeniach wykorzystywanych w komunikacji bezprzewodowej tj. radiomodemy i inne urządzenia z nadajnikiem w tym urządzenia Wi-Fi i Bluetooth,
- urządzenia ciśnieniowe (PED 2014/68/UE) – dyrektywa uwarunkowująca wymagania w zakresie projektowania, wytwarzania i oceny zgodności urządzeń

ciśnieniowych. Ma zastosowanie do urządzeń ciśnieniowych o najwyższym dopuszczalnym ciśnieniu przekraczającym 0,5 bar,
- transportowalne urządzenia ciśnieniowe (TPED 2010/35/UE) – jest to dyrektywa która skupia szczególną uwagę i stawia kolejne wymagania dla urządzeń ciśnieniowych takich jak butle, zbiorniki i inne akcesoria wykorzystywane w urządzeniach mobilnych i transportowych,
- urządzenia przeznaczone do pracy w atmosferach potencjalnie wybuchowych (ATEX 2014/34/UE) – dyrektywa określająca wymagania dla sprzętu pracującego np. przy przeładunku paliw, pyłów palnych, chemikaliów.

W praktyce większość maszyn podlega kilku dyrektywom równocześnie. Dobrym przykładem jest tu elektryczny wózek widłowy przeznaczony do pracy w magazynie materiałów łatwopalnych. Taki wózek musi spełniać wymagania zarówno dla MD, LVD, EMC i ATEX. Powyższe dyrektywy tyczą się maszyn i urządzeń ale warto napomnieć o innych aktach prawnych które dotyczą również innych środków technicznych wykorzystywanych w transporcie np. hałas do środowiska (2000/14/WE), ogólne bezpieczeństwo produktów (nowe rozporządzenie UE 2023/988 GSPR) czy środki ochrony indywidualnej (PPE 2016/425).

2. Dyrektywa maszynowa 98/37/WE a 2006/42/WE – główne różnice i ewolucja przepisów

Dyrektywa maszynowa stanowi kluczowy element europejskiego systemu zapewniania bezpieczeństwa technicznego maszyn. Na przestrzeni lat rozwój przepisów odzwierciedlał nie tylko postęp technologiczny, ale również zmiany w podejściu Unii Europejskiej do ochrony zdrowia, życia oraz środowiska pracy. Ewolucja od dyrektywy 98/37/WE do 2006/42/WE była odpowiedzią na rosnące oczekiwania wobec producentów, użytkowników oraz służb nadzoru rynku. Wprowadzenie nowej dyrektywy miało na celu zarówno zwiększenie poziomu bezpieczeństwa, jak i ujednolicenie wymagań w całej Wspólnocie.

Dyrektywa 2006/42/WE została opracowana w celu zastąpienia wcześniejszej dyrektywy 98/37/WE, która mimo licznych nowelizacji nie odpowiadała już w pełni na potrzeby dynamicznie rozwijającego się rynku technologii i bezpieczeństwa. Głównymi powodami wprowadzenia nowej dyrektywy były:
- ujednolicenie i uproszczenie przepisów,
- dostosowanie do postępu technicznego,
- zwiększenie poziomu bezpieczeństwa użytkowników,
- harmonizacja z innymi dyrektywami tzw. „nowego podejścia”,

- zwiększenie odpowiedzialności producentów,
- wsparcie dla swobodnego przepływu towarów w Unii Europejskiej.

Nowa dyrektywa miała uporządkować przepisy i wyeliminować rozbieżności interpretacyjne występujące w 98/37/WE, jednocześnie dostosowując prawo do gwałtownego rozwoju automatyki i systemów sterowania. Wprowadzenie jej przepisów zwiększyło nacisk na ocenę ryzyka i funkcje bezpieczeństwa, co poprawiło ochronę operatorów maszyn (Pamuła, 2011). Ponadto dyrektywa wzmocniła odpowiedzialność producentów za dokumentację techniczną i zgodność maszyn przez cały cykl ich życia, zapewniając spójność z innymi aktami prawnymi nowego podejścia.

2.1. Kluczowe zmiany względem dyrektywy 98/37/WE

Dyrektywa Maszynowa 2006/42/WE wprowadziła szereg istotnych zmian w zakresie definicji, obowiązków producentów oraz procedur oceny zgodności, mających na celu podniesienie poziomu bezpieczeństwa maszyn oraz ujednolicenie wymagań w krajach członkowskich. Najważniejsze z nich to:

- rozszerzenie definicji maszyny, w tym wprowadzenie pojęcia maszyny nieukończonej,
- uściślenie obowiązków producenta i zasad dotyczących dokumentacji technicznej,
- wprowadzenie załącznika IV z listą maszyn wysokiego ryzyka,
- doprecyzowanie wymagań dotyczących oznakowania CE i instrukcji obsługi,
- rozszerzenie przepisów o bezpieczeństwo systemów sterowania.

W praktyce rozszerzona definicja maszyny (art. 2 dyrektywy) objęła także zespoły elementów przeznaczone do połączenia oraz maszyny napędzane energią nie tylko mechaniczną, ale również elektryczną, pneumatyczną czy hydrauliczną. Nowe pojęcie maszyny nieukończonej pozwoliło producentom podzespołów wprowadzać je do obrotu pod warunkiem wystawienia „deklaracji włączenia” i przygotowania dokumentacji technicznej ograniczonej do obszaru ich odpowiedzialności.
W zakresie obowiązków producenta dodano wymóg wyznaczenia osoby upoważnionej do przechowywania dokumentacji technicznej na terenie Unii Europejskiej przez co najmniej 10 lat od daty wyprodukowania maszyny. Dyrektywa wprowadziła również załącznik IV, który zawiera wykaz 23 grup maszyn uznanych za szczególnie niebezpieczne, dla których przewidziana jest osobna procedura oceny zgodności.

Kolejną istotną zmianą było doprecyzowanie zasad dotyczących oznakowania CE – producent musi nie tylko umieścić znak na maszynie, ale również zadeklarować zgodność ze wszystkimi mającymi zastosowanie dyrektywami (np. EMC, LVD, ATEX) czyli przygotować deklarację zgodności WE. Z kolei wymagania dotyczące instrukcji obsługi zostały rozszerzone o obowiązek jej tłumaczenia na język kraju użytkowania oraz szczegółowe informacje o poziomach hałasu, drgań i pozostałych zagrożeniach. Dyrektywa 2006/42/WE wprowadziła także odniesienia do norm EN ISO 13849 i IEC 62061, które określają wymagania dla systemów sterowania związanych z bezpieczeństwem, definiując poziomy nienaruszalności bezpieczeństwa (PL i SIL). Dzięki tym zmianom przepisy uzyskały większą precyzję, a producenci – jasne wytyczne dotyczące oceny ryzyka, projektowania układów sterowania i dokumentowania zgodności z przepisami.

2.2. Znaczenie zmian dla sektora transportu

Wprowadzenie dyrektywy 2006/42/WE przyniosło wymierne efekty w obszarze bezpieczeństwa maszyn transportowych, wpływając na sposób ich projektowania, użytkowania i nadzorowania. Szczególnie widoczne zmiany zaszły w odniesieniu do urządzeń dźwigowych, załadunkowych oraz systemów transportu wewnętrznego. Wózki widłowe, suwnice, podnośniki i rampy załadunkowe wyposażono w funkcje bezpieczeństwa, takie jak awaryjne zatrzymanie, blokady przeciążeniowe, czujniki obecności operatora czy automatyczne systemy stabilizacji. W efekcie zmniejszyła się liczba wypadków związanych z przeładunkiem i obsługą urządzeń transportowych.

Kolejnym rezultatem wprowadzenia „nowego podejścia” było podniesienie jakości dokumentacji technicznej i instrukcji obsługi. Nowe przepisy wymagały, aby każda maszyna posiadała szczegółowy opis funkcji bezpieczeństwa, danych eksploatacyjnych oraz procedur konserwacyjnych. Dla operatorów przenośników taśmowych, wind towarowych i automatycznych systemów sortujących oznaczało to lepsze przygotowanie do pracy i szybsze reagowanie w sytuacjach awaryjnych.

Wraz z wejściem w życie dyrektywy wzrosła niezawodność systemów sterowania stosowanych w transporcie. Wprowadzenie odniesień do norm (PN-EN ISO 13849-1:2023-09; IEC 62061:2021) wymusiło projektowanie układów sterowania z uwzględnieniem poziomów nienaruszalności bezpieczeństwa (PL, SIL). W automatycznych liniach załadunkowych standardem stały się zabezpieczenia w postaci wielopoziomowych systemów wykrywania kolizji, blokady stref pracy oraz redundancja czujników. Zabezpieczenia te ograniczyły ryzyko błędów ludzkich

i awarii systemowych. Znaczącą zmianą było również ułatwienie integracji systemów transportowych poprzez wprowadzenie pojęcia maszyny nieukończonej. Dzięki temu producenci mogli certyfikować częściowo gotowe podzespoły, takie jak moduły przenośników, podnośników czy manipulatorów, jeszcze przed ich włączeniem w kompletną linię transportową. Takie rozwiązanie pozwoliło na etapową weryfikację zgodności, zwiększając bezpieczeństwo całych instalacji i skracając czas ich wdrażania. Wdrożenie dyrektywy usprawniło także nadzór rynku w sektorze transportowym. Organy kontrolne uzyskały klarowne kryteria oceny zgodności, co pozwoliło skuteczniej eliminować z rynku maszyny niespełniające wymagań (Guide to application of the Machinery Directive, 2019).

3. Nowe Rozporządzenie Maszynowe (UE) 2023/1230 – rewolucja a może ewolucja bezpieczeństwa maszyn

Nowe Rozporządzenie Maszynowe (UE) 2023/1230 zostało przyjęte w czerwcu 2023 roku i wchodzi w życie 20 stycznia 2027r, zastępując Dyrektywę 2006/42/WE (Rozporządzenie (UE) 2023/1230, Dz.U. UE L 165/1, 29.6.2023). Głównym powodem jego opracowania była potrzeba dostosowania przepisów do realiów cyfrowej gospodarki, automatyzacji i rosnącego udziału oprogramowania w funkcjonowaniu maszyn. Dotychczasowa dyrektywa, mimo licznych aktualizacji, nie obejmowała w wystarczającym stopniu zagadnień takich jak bezpieczeństwo cybernetyczne, sztuczna inteligencja, aktualizacje oprogramowania czy maszyny autonomiczne.

Wprowadzenie rozporządzenia ma na celu ujednolicenie wymagań prawnych w całej Unii Europejskiej, wyeliminowanie rozbieżności interpretacyjnych między państwami członkowskimi oraz zapewnienie lepszej ochrony użytkowników i operatorów maszyn. Rozporządzenie, w przeciwieństwie do dyrektywy, jest bezpośrednio stosowane we wszystkich krajach UE bez konieczności implementacji do prawa krajowego. Dzięki temu ma zapewnić pełną spójność przepisów i ograniczyć czas potrzebny na wdrażanie nowych wymagań bezpieczeństwa.

3.1. Kluczowe zmiany wprowadzone przez Rozporządzenie 2023/1230

Nowe przepisy wprowadzają liczne modyfikacje i rozszerzenia w stosunku do poprzedniej dyrektywy.

Najważniejsze z nich to:

- rozszerzenie zakresu stosowania – rozporządzenie obejmuje nie tylko klasyczne maszyny, ale również maszyny sterowane oprogramowaniem, systemy autonomiczne i komponenty cyfrowe wpływające na bezpieczeństwo działania,
- bezpieczeństwo cybernetyczne – dodano obowiązek ochrony przed nieuprawnionym dostępem i ingerencją w systemy sterowania. Producent musi zapewnić integralność danych, w tym aktualizacji oprogramowania, które nie mogą obniżać poziomu bezpieczeństwa maszyny,
- oprogramowanie jako element bezpieczeństwa – aktualizacje i modyfikacje oprogramowania są traktowane na równi z modernizacją sprzętową i wymagają ponownej oceny ryzyka,
- cyfrowa dokumentacja techniczna – dopuszczono pełną digitalizację dokumentacji, w tym deklaracji zgodności i instrukcji obsługi, które mogą być dostarczane w formie elektronicznej,
- nowa klasyfikacja maszyn wysokiego ryzyka – w załączniku I określono listę maszyn i komponentów, dla których wymagane jest zaangażowanie jednostki notyfikowanej,
- zastosowanie sztucznej inteligencji i systemów autonomicznych – rozporządzenie obejmuje maszyny wykorzystujące uczenie maszynowe oraz podejmujące decyzje bez bezpośredniego nadzoru człowieka,
- zwiększone obowiązki producentów – konieczność prowadzenia analiz bezpieczeństwa dla całego cyklu życia maszyny, w tym aktualizacji oprogramowania i zdalnego sterowania (Rozporządzenie (UE) 2023/1230; European Commission, 2023 – guidance).

Nowe przepisy lepiej definiują odpowiedzialność poszczególnych uczestników rynku: producentów, importerów i dystrybutorów, oraz wprowadzają bardziej szczegółowe zasady nadzoru rynku, co ma zapewnić szybsze reagowanie na niezgodności i wady produktów.

3.2. Konsekwencje w sektorze transportu

Rozporządzenie 2023/1230 przynosi znaczące konsekwencje, zwłaszcza w zakresie rozwoju automatyzacji i cyfryzacji procesów logistycznych. Maszyny transportowe, takie jak autonomiczne wózki AGV, roboty magazynowe, automatyczne linie załadunkowe czy inteligentne systemy sortowania, podlegają teraz bardziej szczegółowym wymaganiom dotyczącym oceny ryzyka i cyberbezpieczeństwa. Przykładowo, systemy AGV muszą być projektowane w taki sposób, aby uniemożliwić zdalne przejęcie kontroli lub modyfikację oprogramowania bez

autoryzacji. Producenci są zobowiązani do implementacji środków ochrony danych i funkcji bezpieczeństwa reagujących na błędy komunikacji sieciowej.

Nowe przepisy wymuszają także monitorowanie integralności oprogramowania w czasie rzeczywistym, co ma zapobiec sytuacjom, w których aktualizacja systemu prowadziłaby do obniżenia poziomu bezpieczeństwa maszyny. W obszarze logistyki i transportu wewnętrznego szczególne znaczenie ma wprowadzenie cyfrowych instrukcji obsługi i deklaracji zgodności, które mogą być udostępniane operatorom w formie interaktywnej dokumentacji online. Ułatwia to szkolenie pracowników, usprawnia zarządzanie flotą maszyn oraz zwiększa dostępność informacji o stanie bezpieczeństwa urządzeń. W praktyce nowe rozporządzenie wymusza na producentach transportowych systemów automatycznych wprowadzenie zintegrowanych procedur cyberbezpieczeństwa i analizy ryzyka dla całego cyklu życia urządzenia. Dzięki temu bezpieczeństwo w środowiskach takich jak magazyny wysokiego składowania, terminale przeładunkowe czy porty logistyczne zostanie dostosowane do wymogów ery cyfrowej.

4. Ocena ryzyka zgodnie z PN-EN ISO 12100

Norma PN-EN ISO 12100:2012 „Bezpieczeństwo maszyn – Ogólne zasady projektowania – Ocena ryzyka i zmniejszanie ryzyka” stanowi podstawowy dokument odniesienia w procesie projektowania bezpiecznych maszyn, w tym urządzeń transportowych (PN-EN ISO 12100:2012). Określa ona metodyczne podejście do identyfikacji zagrożeń, szacowania i redukcji ryzyka, a także wskazuje strategie zapewnienia bezpieczeństwa przez cały cykl życia maszyny – od projektu po eksploatację i wycofanie z użycia.

Norma PN-EN ISO 12100:2012 jest podstawowym dokumentem międzynarodowym określającym zasady projektowania bezpiecznych maszyn. Składa się z dwóch zasadniczych części:

- terminologia i metodologia – definiuje kluczowe pojęcia z zakresu bezpieczeństwa maszyn (m.in. zagrożenie, ryzyko, ochrona, środki bezpieczeństwa) oraz opisuje iteracyjny charakter procesu oceny ryzyka, który powinien być powtarzany na każdym etapie projektowania.
- zasady techniczne i środki ochronne – przedstawia sposoby eliminowania lub ograniczania ryzyka poprzez środki konstrukcyjne, techniczne i organizacyjne. Zawiera wskazówki dotyczące projektowania układów sterowania, osłon, blokad, znakowania oraz opracowywania informacji dla użytkownika (PN-EN ISO 12100:2012).

Norma opisuje trzy podstawowe etapy zapewniania bezpieczeństwa maszyn:
1) Identyfikację zagrożeń i ocenę ryzyka,
2) Redukcję ryzyka – poprzez eliminację zagrożeń u źródła lub zastosowanie środków ochronnych,
3) Weryfikację skuteczności środków bezpieczeństwa.

PN-EN ISO 12100 stanowi dokument nadrzędny wobec innych norm szczegółowych, takich jak PN-EN ISO 13849-1 (bezpieczeństwo systemów sterowania) czy PN-EN 60204-1 (bezpieczeństwo elektryczne maszyn). Stosowanie jej zasad umożliwia producentom wykazanie zgodności z podstawowymi wymaganiami Dyrektywy 2006/42/WE oraz Rozporządzenia (UE) 2023/1230, a także budowę maszyn spełniających europejskie standardy bezpieczeństwa (PN-EN ISO 13849-1:2023-09; PN-EN 60204-1:2018-12)..

4.1. Identyfikacja zagrożeń

Identyfikacja zagrożeń jest pierwszym i kluczowym etapem oceny ryzyka.
W przypadku maszyn stosowanych w transporcie – takich jak wózki widłowe, przenośniki, dźwigi, suwnice, systemy załadunkowe i zautomatyzowane linie transportowe – zagrożenia mogą mieć charakter mechaniczny, elektryczny, ergonomiczny, termiczny lub związany z ruchem ludzi i pojazdów.

Najczęściej występujące zagrożenia w transporcie to:
- zmiażdżenie lub przygniecenie podczas załadunku i rozładunku,
- upadek ładunku z wysokości,
- utrata stabilności maszyny (np. przewrócenie wózka widłowego),
- kontakt z elementami ruchomymi (łańcuchy, taśmy, wały napędowe),
- porażenie prądem elektrycznym,
- niewłaściwa widoczność lub błędy operatora wynikające z niewłaściwej ergonomii stanowiska pracy.

W procesie identyfikacji należy uwzględnić wszystkie fazy cyklu życia maszyny: montaż, użytkowanie, czyszczenie, konserwację oraz demontaż.

4.2. Szacowanie ryzyka

Szacowanie ryzyka zgodnie z PN-EN ISO 12100 opiera się na metodzie grafu ryzyka, która jest jedną z najczęściej stosowanych i rekomendowanych przez normę (PN-EN ISO 12100:2012).

Metoda ta pozwala w sposób logiczny i systematyczny określić poziom ryzyka na podstawie trzech kluczowych czynników:

- ciężkości możliwych obrażeń (S),
- częstotliwości lub czasu narażenia (F)
- możliwości uniknięcia zagrożenia (P).

W praktyce graf ryzyka (Rys. 1) stanowi uproszczony schemat decyzyjny, prowadzący krok po kroku do przypisania odpowiedniego poziomu ryzyka.

Proces rozpoczyna się od oceny ciężkości obrażeń (S):

- S1 – obrażenia lekkie (odwracalnie),
- S2 – obrażenia ciężkie (nie odwracalne również w tym zgon).

Następnie analizuje się częstotliwość i czas przebywania w strefie zagrożenia (F):

- F1 – rzadkie i/lub krótkotrwałe narażenie na zagrożenie,
- F2 – częste i/lub długotrwałe narażenie na zagrożenie.

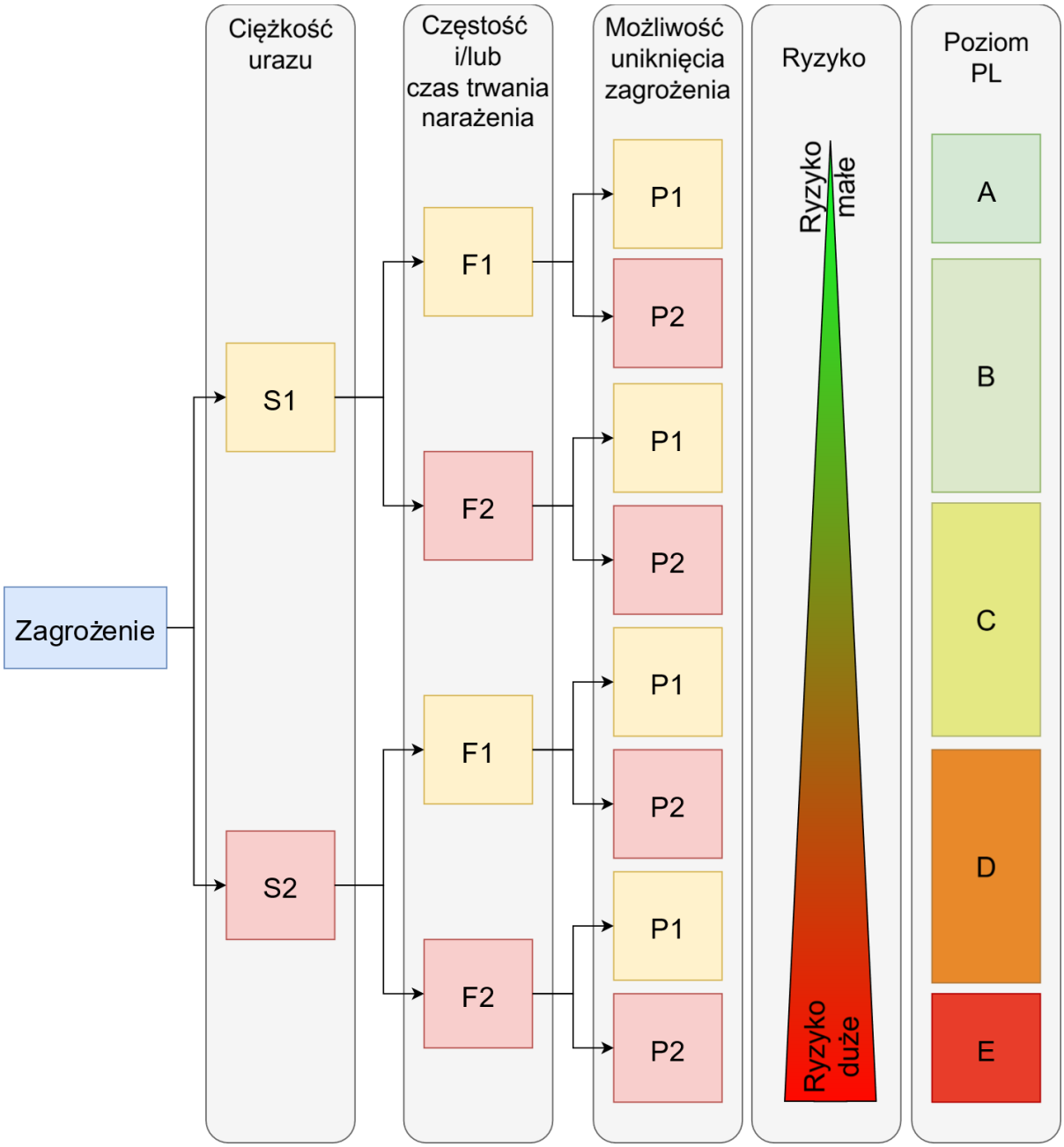
Ostatnim krokiem jest określenie możliwości uniknięcia zagrożenia lub ograniczenia szkody (P):

- P1 – możliwe pod pewnymi warunkami,
- P2 – prawie nie możliwe.

Po zebraniu danych dla trzech parametrów wynik wprowadza się do grafu, który wskazuje odpowiedni poziom ryzyka (np. niski, średni, wysoki) oraz wymagany poziom zapewnienia bezpieczeństwa PLr (performace level required) oznaczony literami od a do e. Zaletą metody grafu jest jej przejrzystość i łatwość zastosowania zarówno w projektowaniu nowych maszyn, jak i przy ocenie modernizacji urządzeń istniejących. W przeciwieństwie do prostych matryc ryzyka, graf uwzględnia także zależności między parametrami, co pozwala uzyskać bardziej precyzyjny wynik oceny.

[Tekst alternatywny. Graf szacowania ryzyka zgodnie z PN-EN ISO 12100. Schemat przedstawia drzewo decyzyjne (graf) używany do szacowania poziomu ryzyka przy projektowaniu maszyn. Punkt początkowy prowadzi do dwóch gałęzi odpowiadających ciężkości skutków zagrożenia: *S1 – obrażenia lekkie lub średnie* oraz *S2 – obrażenia ciężkie lub śmiertelne*. Każda z gałęzi rozdziela się następnie na dwa poziomy częstotliwości narażenia: *F1 – rzadkie lub krótkotrwałe narażenie* oraz *F2 – częste lub długotrwałe narażenie*. Od każdego poziomu F odchodzą kolejne rozgałęzienia zależne od możliwości uniknięcia zagrożenia: *P1 – możliwe do*

uniknięcia w większości przypadków i *P2 – trudne do uniknięcia lub nieuniknione*. Każda ścieżka kończy się przypisaniem poziomu wymaganego bezpieczeństwa funkcjonalnego oznaczonego literami od **a** (najniższy poziom ryzyka) do **e** (najwyższy poziom ryzyka).]



Rys. 1. Graf szacowania ryzyka zgodnie z PN-EN ISO 12100

Po dokonaniu oceny ryzyka podejmuje się działania redukujące, stosując trzystopniową hierarchię środków ochronnych:

- eliminacja zagrożenia u źródła – poprzez zmianę konstrukcji maszyny lub sposobu jej działania (np. zastosowanie napędu elektrycznego zamiast spalinowego w pomieszczeniach zamkniętych).
- techniczne środki zabezpieczające – osłony, kurtyny świetlne, wyłączniki awaryjne, blokady bezpieczeństwa.
- środki organizacyjne i informacyjne – szkolenia, oznakowanie, instrukcje obsługi, środki ochrony indywidualnej (PN-EN ISO 12100:2012).

5. Redukcja ryzyka i weryfikacja spełnienia PLr

Po określeniu poziomu wymaganego bezpieczeństwa (PLr) dla każdej funkcji bezpieczeństwa, należy dobrać odpowiednie środki techniczne i organizacyjne, które pozwolą ten poziom osiągnąć. Proces redukcji ryzyka polega na systematycznym obniżaniu ryzyka do poziomu akceptowalnego, z zachowaniem zasady, że najpierw stosuje się środki eliminujące zagrożenie, a dopiero później techniczne i organizacyjne zabezpieczenia.

Etapy redukcji ryzyka:

1) Eliminacja zagrożenia u źródła – np. zmiana konstrukcji maszyny tak, aby pracownik nie miał kontaktu z niebezpiecznymi elementami (osłony, zabudowy).
2) Zastosowanie środków technicznych ochronnych – np. kurtyny świetlne, rygle bezpieczeństwa, linki STOP, przekaźniki bezpieczeństwa.
3) Wdrożenie środków organizacyjnych i proceduralnych – szkolenia, instrukcje BHP, oznakowanie, kontrola dostępu do stref pracy.

Każdy środek ma przypisany wpływ na zmniejszenie ryzyka, a ich kombinacja musi zapewnić osiągnięcie wymaganego Poziomu Zapewnienia Bezpieczeństwa (PLr)

5.1. Dobór kategorii elementów bezpieczeństwa (wg PN-EN ISO 13849-1)

Norma PN-EN ISO 13849-1 opisuje pięć kategorii systemów bezpieczeństwa (B, 1, 2, 3, 4), które różnią się niezawodnością i odpornością na awarie – im wyższa kategoria, tym bardziej system jest odporny na błędy i awarie. Po wyznaczeniu celu PLr (wymaganego poziomu zapewnienia bezpieczeństwa) dla każdej funkcji bezpieczeństwa trzeba dobrać takie rozwiązania techniczne i organizacyjne, by PL osiągany przez łańcuch bezpieczeństwa (czujnik → logika → element wykonawczy)

był co najmniej równy celowi PLr. W praktyce oznacza to odpowiedni dobór architektury układu oraz komponentów o wystarczającej niezawodności.
Aby osiągnąć wymagany cel PLr, projektant dobiera kategorię układu sterowania (architekturę odporności na awarie) oraz weryfikuje trzy kluczowe wielkości:

- MTTFd (Mean Time To dangerous Failure) – statystyczny „czas do niebezpiecznej awarii" dla kanałów czujników/wykonawczych (w praktyce: niski/średni/wysoki poziom niezawodności komponentów),
- DCavg (średni poziom diagnostyki) – jak skutecznie układ wykrywa własne uszkodzenia (brak/niski/średni/wysoki),
- CCF (Common Cause Failures) – odporność układu na wspólne przyczyny uszkodzeń (np. ten sam kabel, to samo źródło zasilania, ten sam czynnik środowiskowy);

Dobór kategorii systemów bezpieczeństwa zależny jest od wyznaczonego celu PLr. Im wyższy cel PLr tym wyższa wymagana kategoria systemu bezpieczeństwa.
W uproszczeniu można przyjąć że dla celu PLr:

- a – zwykle wystarczy kategoria B lub 1,
- b – zwykle wystarczy kategoria 1 lub 2 z podstawową diagnostyką,
- c – często kategoria 2 lub 3 (co najmniej częściowa redundancja lub testy okresowe),
- d – najczęściej kat. 3 (dwa kanały + diagnostyka),
- e – zazwyczaj kat. 4 (pełna redundancja, ciągła diagnostyka, wysoki MTTFd).

W codziennej eksploatacji maszyn szczególną uwagę należy zwracać na stan i działanie elementów bezpieczeństwa, ponieważ to od ich niezawodności zależy utrzymanie wymaganego poziomu bezpieczeństwa (PL). Operatorzy oraz służby techniczne powinni regularnie sprawdzać poprawność działania urządzeń takich jak przyciski awaryjnego zatrzymania, linki STOP, kurtyny świetlne czy osłony ryglowane. Każdy z tych elementów ma określony poziom PL lub kategorię (np. CAT 3, PL d, Type 4), które można znaleźć na tabliczce znamionowej lub w dokumentacji producenta. Te oznaczenia informują o jakości i klasie zabezpieczenia, dlatego są cenną wskazówką podczas kontroli stanu technicznego maszyny. Równie istotne jest prowadzenie regularnych testów funkcjonalnych. Testy te powinny obejmować sprawdzenie, czy układ bezpieczeństwa prawidłowo reaguje na zadziałanie poszczególnych urządzeń, np. czy naciśnięcie przycisku STOP natychmiast zatrzymuje przenośnik, a linka awaryjna działa na całej długości. Takie testy nie tylko potwierdzają sprawność techniczną zabezpieczeń, ale też pomagają wykryć błędy montażowe lub uszkodzenia przewodów, które mogą obniżyć osiągany poziom PL (Dźwiarek, 2012). Podczas eksploatacji należy również pamiętać, że każda

modyfikacja maszyny – nawet pozornie drobna, jak wymiana przekaźnika czy czujnika na inny model – może wpływać na poziom bezpieczeństwa. Dlatego wszelkie zmiany w układzie sterowania powinny być analizowane pod kątem utrzymania dotychczasowego PL, a w razie wątpliwości należy przeprowadzić ponowną ocenę ryzyka.

Aby ułatwić zrozumienie zależności pomiędzy poszczególnymi kategoriami układów bezpieczeństwa a ich zastosowaniem w praktyce, poniżej zestawiono w formie tabelarycznej najważniejsze informacje dotyczące ich charakterystyki oraz przykładowych rozwiązań stosowanych w maszynach (Tabela 1).
Zawarte w tabeli opisy mają charakter poglądowy i pomagają rozpoznać, jakie elementy lub układy sterowania mogą odpowiadać danej kategorii zgodnie z normą PN-EN ISO 13849-1 (PN-EN ISO 13849-1:2023-09).

Tabela 1. Zestawienie kategorii bezpieczeństwa oraz przykładów ich praktycznego zastosowania

Kategoria	**Charakterystyka**	**Przykład elementów**
B	Pojedynczy kanał; brak diagnostyki;	Pojedynczy wyłącznik STOP na panelu; podstawowa krańcówka drzwiowa
1	Pojedynczy kanał o podwyższonej niezawodności (wysoki MTTFd); brak aktywnej diagnostyki	Krańcówka bezpieczeństwa wysokiej jakości odcinająca napęd
2	Pojedynczy kanał + testy okresowe (diagnostyka w interwałach)	Linka STOP z kontrolą ciągłości; test kurtyny w procedurze zmiany zmiany
3	Dwa kanały (redundancja) + diagnostyka częściowa; pojedyncza awaria nie powoduje utraty funkcji	Dwa styczniki główne + przekaźnik bezpieczeństwa; kurtyna + podwójny tor sterowania
4	Dwa kanały + ciągła diagnostyka; odporność na pojedyncze awarie i ich wykrywanie w każdym momencie	Sterownik bezpieczeństwa, dwa czujniki ryglujące kodowane, nadzór styków i zwarć

6. Przykład szacowania ryzyka wraz z przykładowymi funkcjami bezpieczeństwa

Poniżej przedstawiono przykładową analizę ryzyka dla urządzenia transportowego w oparciu o wymagania normy PN-EN ISO 12100. Analiza obejmuje identyfikację zagrożeń, szacowanie ryzyka przy użyciu grafu oraz dobór odpowiednich kategorii i poziomów zapewnienia bezpieczeństwa (PL) dla funkcji bezpieczeństwa. Celem tego przykładu jest pokazanie pełnego toku postępowania – od identyfikacji zagrożeń do weryfikacji skuteczności zastosowanych środków ochronnych (PN-EN ISO 12100:2012).

Przykład będzie opierał się na przenośniku taśmowym wykorzystywanym w magazynie wysokiego składowania do transportu palet i pojemników. Urządzenie obsługują operatorzy linii, brygadziści oraz służby utrzymania ruchu. Przenośnik pracuje w otoczeniu stref przejść oraz miejsc załadunku i rozładunku, co wymaga szczególnego uwzględnienia bezpieczeństwa eksploatacji.

W pierwszym kroku należy ustalić możliwe zagrożenia występujące podczas użytkowania maszyny, a są to:

- wciągnięcie dłoni lub odzieży w rejonie bębna czołowego lub zwrotnego (Z1),
- kontakt z taśmą lub rolkami na odcinku roboczym (Z2),
- nieplanowany rozruch maszyny podczas czyszczenia lub konserwacji (Z3),
- spadek ładunku z taśmy w strefie załadunku lub rozładunku (Z4).

Po ustaleniu występujących zagrożeń należy przejść do analizy tych zagrożeń.

Zagrożenie 1 (Z1) – Wciągnięcie dłoni/odzieży w rejonie bębna czołowego/zwrotnego:

- ciężkość urazu (S) = urazy ciężkie (S2) – kontakt z punktem wciągania zwykle skutkuje ciężkimi urazami (zmiażdżenie, amputacja).
- częstość i/lub czas trwania narażenia (F) = częste i/lub długotrwałe narażenie (F2) – operatorzy regularnie przebywają w pobliżu strefy (kontrola taśmy, usuwanie drobnych zanieczyszczeń).
- możliwość uniknięcia zagrożenia (P) = uniknięcie prawie nie możliwe (P2) – geometria urządzenia bez dodatkowych środków ochrony nie pozwala na uniknięcie zagrożenia, czar reakcji po zainicjowaniu wciągania przez przenośnik jest zbyt długi aby możliwe było uwolnienie.
- wynik wymaganego poziomu zapewnienia bezpieczeństwa (PLr) = e - Najwyższy cel poziomu zapewnienia bezpieczeństwa

Funkcja bezpieczeństwa SF1: Funkcja izolowania energii poprzez zapobieganie dostępowi do punktu wciągania (osłony stałe/ryglowane z monitorowaniem). Celem tej funkcji jest uniemożliwienie przypadkowego kontaktu człowieka z elementami napędowymi przenośnika, które mogą wciągnąć dłoń, rękaw lub fragment ubrania. W praktyce oznacza to stosowanie osłon stałych (blach, krat, siatek) lub osłon ryglowanych, które można otworzyć tylko po zatrzymaniu maszyny. W wielu maszynach spotyka się specjalne klapy z zamkiem, które wymagają narzędzia do otwarcia – to proste, ale skuteczne zabezpieczenie.
W przypadku konieczności częstego dostępu, stosuje się rygle elektromagnetyczne połączone z układem bezpieczeństwa – dopóki maszyna się nie zatrzyma, zamek się nie odblokuje. Dla operatorów oznacza to, że nie mogą przypadkiem wejść w strefę ruchomych części, nawet jeśli zapomną wyłączyć przenośnika.

Zagrożenie 2 (Z2) – Kontakt z taśmą/rolkami na odcinku prostym:

- ciężkość urazu (S) = urazy lekkie (S1) – najczęściej otarcia, drobne zmiażdżenia; rzadziej ciężkie urazy (mniejsza energia w punkcie styku).
- częstość i/lub czas trwania narażenia (F) = częste i/lub długotrwałe narażenie (F2) – przejścia serwisowe i kontrola pracy odbywają się często.
- możliwość uniknięcia zagrożenia (P) = uniknięcie prawie nie możliwe (P2) – trudność uniknięcia, element porusza się stałą prędkością; widoczność nie zawsze pełna.
- wynik wymaganego poziomu zapewnienia bezpieczeństwa (PLr) = Cel wymaganego poziomu zapewnienia bezpieczeństwa C.

Funkcja bezpieczeństwa SF2: Zatrzymanie awaryjne na całej długości (linka STOP, wyłączniki, monitoring zerwania). Funkcja ta umożliwia natychmiastowe zatrzymanie przenośnika w razie zagrożenia. Stosuje się tu najczęściej linki awaryjne biegnące wzdłuż całego przenośnika lub przyciski „grzybki” rozmieszczone w regularnych odstępach. Pociągnięcie linki lub wciśnięcie przycisku powoduje odcięcie zasilania napędu i zatrzymanie taśmy. Operator może szybko reagować na upadek ładunku, zablokowanie taśmy lub sytuację zagrożenia życia. W nowoczesnych systemach linki awaryjne są objęte nadzorem – system potrafi wykryć ich zerwanie lub niewłaściwe napięcie, co zwiększa niezawodność zabezpieczenia (PN-EN ISO 13850:2016-03; PN-EN 60204-1:2018-12).

Zagrożenie 3 (Z3) – Nieplanowany rozruch podczas czyszczenia/serwisu (brak bezpiecznego wyłączenia):

- ciężkość urazu (S) = urazy ciężkie (S2) – urazy mogą być bardzo ciężkie (kontakt z napędem/punktem wciągania przy zdemontowanych osłonach).
- częstość i/lub czas trwania narażenia (F) = rzadkie i/lub krótkotrwałe narażenie (F1) – prace serwisowe okresowe, jednak powtarzalne w cyklu życia maszyny.
- możliwość uniknięcia zagrożenia (P) = uniknięcie prawie nie możliwe (P2) – przy nie planowanym rozruchu i brakiem kontroli uniknięcie jest wręcz nie możliwe.
- wynik wymaganego poziomu zapewnienia bezpieczeństwa (PLr) = Cel wymaganego poziomu zapewnienia bezpieczeństwa D.

Funkcja bezpieczeństwa SF3: Bezpieczne wyłączenie, blokada energetyczna (LOTO) i monitorowanie rozłączenia energii napędów. Ta funkcja chroni personel utrzymania ruchu i konserwatorów przed przypadkowym uruchomieniem przenośnika podczas czyszczenia lub naprawy. Skrót LOTO (Lockout–Tagout) oznacza odcięcie i oznakowanie źródeł energii, tak aby maszyna była w pełni unieruchomiona.
W praktyce operatorzy stosują wyłączniki główne z możliwością założenia kłódki oraz tabliczki informujące o pracach serwisowych. W systemach zautomatyzowanych dodatkowo stosuje się przekaźniki lub sterowniki bezpieczeństwa, które nadzorują, czy energia została faktycznie odłączona i czy nie występują napięcia resztkowe. Dla użytkownika kluczowe jest, aby żadna osoba nie mogła uruchomić przenośnika, dopóki serwisant nie zdejmie blokady i nie potwierdzi zakończenia prac. To rozwiązanie ma duże znaczenie organizacyjne — w wielu firmach procedura LOTO jest częścią instrukcji stanowiskowej (PN-EN 60204-1:2018-12).

Zagrożenie 4 (Z4) – Spadek ładunku w strefie załadunku/rozładunku (uderzenie osób):

- ciężkość urazu (S) = urazy ciężkie (S2) – uderzenie kilkunastu/kilkudziesięciu kilogramowym ładunkiem może powodować ciężkie obrażenia.
- częstość i/lub czas trwania narażenia (F) = rzadkie i/lub krótkotrwałe narażenie (F1) – zdarzenia incydentalne (błędy ułożenia, zacięcie), nie w każdym cyklu.
- możliwość uniknięcia zagrożenia (P) = możliwe do uniknięcia (P1) – możliwość opuszczenia strefy załadunku/rozładunku.
- wynik wymaganego poziomu zapewnienia bezpieczeństwa (PLr) = Cel wymaganego poziomu zapewnienia bezpieczeństwa C.

Funkcja bezpieczeństwa SF4: Ograniczenie dostępu i nadzór stref – wygrodzenia, kurtyna świetlna/skaner, logika zezwolenia. Celem tej funkcji jest ochrona osób znajdujących się w pobliżu przenośnika, szczególnie w strefach załadunku

i rozładunku. Stosuje się tu ogrodzenia, barierki, kurtyny świetlne, skanery obszarowe lub systemy nadzorujące obecność ludzi w określonych miejscach. W transporcie wewnętrznym to bardzo istotne, bo w tych strefach często spotykają się maszyny i piesi pracownicy. Kurtyny świetlne działają jak niewidzialna bariera – jeśli ktoś wejdzie w jej obszar, maszyna automatycznie się zatrzyma. Skuteczne są też systemy logiki zezwolenia, które wymagają potwierdzenia obecności operatora (np. naciśnięcia przycisku lub skanowania karty), zanim proces zostanie wznowiony. Dzięki temu ryzyko potrącenia lub uderzenia ładunkiem spada praktycznie do zera (PN-EN ISO 13855:2025-06).

7. Literatura

Dyrektywa 2006/42/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 17 maja 2006 r. w sprawie maszyn i zmiany dyrektywy 95/16/WE. Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej, L 157, 24–86.

Dźwiarek, M. (2012). Bezpieczeństwo funkcjonalne systemów sterowania maszynami. Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.

European Commission. (2019). Guide to application of the Machinery Directive 2006/42/EC. Publications Office of the European Union.

European Commission. (2023). Guide to application of the Machinery Regulation (EU) 2023/1230. Publications Office of the European Union.

IEC 62061:2021. (2021). Safety of machinery – Functional safety of safety-related control systems. International Electrotechnical Commission.

Pamuła, W. (2011). Niezawodność i bezpieczeństwo: wybór zagadnień. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.

PN-EN 60204-1:2018-12. (2018). Bezpieczeństwo maszyn – Wyposażenie elektryczne maszyn – Część 1: Wymagania ogólne. Polski Komitet Normalizacyjny.

PN-EN ISO 12100:2012. (2012). Bezpieczeństwo maszyn – Ogólne zasady projektowania – Ocena ryzyka i zmniejszanie ryzyka. Polski Komitet Normalizacyjny.

PN-EN ISO 13849-1:2023-09. (2025). Bezpieczeństwo maszyn – Części systemów sterowania związanych z bezpieczeństwem – Część 1: Ogólne zasady projektowania. Polski Komitet Normalizacyjny.

PN-EN ISO 13850:2016-03. (2017). Bezpieczeństwo maszyn – Funkcja zatrzymania awaryjnego – Zasady projektowania. Polski Komitet Normalizacyjny.

PN-EN ISO 13855:2025-06. (2025). Bezpieczeństwo maszyn – Pozycjonowanie środków ochronnych w zależności od prędkości zbliżania się ciała człowieka. Polski Komitet Normalizacyjny.

Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2023/1230 z dnia 29 czerwca 2023 r. w sprawie maszyn oraz uchylenia dyrektywy 2006/42/WE. Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej, L 165/1.